

**CORRELACION ENTRE EL METODO GEOGAUGE Y EL METODO DEL CONO  
DE ARENA PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DEL SUELO EN CAMPO**

**EDUARDO E. SIERRA PEREZ  
MARTIN A. VARELA PATERNINA**



**UNIVERSIDAD  
DE LA COSTA**  
1970

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL  
BARRANQUILLA  
2012**

**CORRELACION ENTRE EL METODO GEOGAUGE Y EL METODO DEL CONO  
DE ARENA PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DEL SUELO EN CAMPO**

**EDUARDO E. SIERRA PEREZ  
MARTIN A. VARELA PATERNINA**

**Proyecto de Grado presentado como requisito para  
Optar al Título de Ingeniero Civil**

**Director:  
ING. MARGARETH GUTIERREZ**



**UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL  
BARRANQUILLA  
2012**

## NOTAS DE ACEPTACIÓN

Se obtuvo la calificación de:  
4.0

---

Ing. Nayib Moreno  
Director de Programa

---

Ing. Margareth Gutiérrez  
Director del Proyecto

---

Jurado del Proyecto

Barranquilla, Diciembre del 2012

## **DEDICATORIA**

Dedico este gran logro, a Dios, a mis padres y mi familia que me han dado un apoyo incondicional, quienes han sido, son y seguirán siendo la cimentación sobre la que construyo mi vida. Gracias por siempre estar ahí para mi.

**EDUARDO SIERRA PEREZ**

## **DEDICATORIA**

Dedico este logro a mi Dios, mi familia que siempre han sido un apoyo incondicional en mis proyectos.

MARTIN VARELA PATERNINA

## **AGRADECIMIENTO**

Nuestro agradecimiento a mi padre que sus conocimientos y apoyo han sido muy valiosos para poder lograr este proyecto.

## **AGRADECIMIENTO**

Dedico este logro a mi Dios, mi familia que siempre han sido un apoyo incondicional en mis proyectos.

MARTIN VARELA PATERNINA

## RESUMEN

En las siguientes líneas se resumirá detalladamente cual fue el proceso que se ejecuto para lograr el objetivo principal de esta investigación.

Para poder llevar a cabo el desarrollo de una correlación estadística se necesito de una serie de mediciones en campo obtenidas a través de la implementación de cada uno de los métodos tanto como de cono de arena como de geogague, lo cual nos aporó la información necesaria para establecer el grado de concordancia que existe entre la densidad medida con el cono de arena y la rigidez medida con el geogauge. Para esto fue necesario primero caracterizar el suelo con el que se trabajo por medio de ensayos de laboratorio como lo son, granulometría, el ensayo de cono de arena, la prueba de geogauge, el ensayo proctor modificado, ensayo CBR. Luego de tener las características básicas del suelo, se procede a construir cinco tramos cuadrados de dimensiones iguales, para este caso los tramos se construyeron de dos metros de largo por dos metros de ancho, con un espesor de 15 cm de altura, cada uno a una humedad diferente iniciando con humedad de 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, cada tramo se compacto con un dispositivo conocido como compactador manual tipo “rana”, logrando que se estableciera una capa homogénea y continua para efectos de tener una alta calidad de medida con ambos métodos.

Luego de construido el primer tramo se procedió a tomar mediciones, construido cada tramo se tomo mediciones bajo el siguiente parámetro, 20 mediciones con el método del geogauge por cada 3 mediciones con cono de arena, este proceso se debió repetir por cada uno de los 5 tramos que se fueron elaborando con distintas humedades. Dado que los tramos eran de forma cuadrada se debió seguir un patrón común para la medición, este patrón se describe como medición tipo “caracol” es decir, que se eligió una de las 4 esquinas del tramo y se inicia las mediciones con geogauge una tras otra aproximadamente 40 cm de distancia una de la otra siguiendo una secuencia desde la parte más exterior del tramo en sentidos de las manecillas del reloj, hacia la parte más interior o centro del tramo, resultando así en una forma de caracol. Durante este proceso se va controlando la humedad del material por medio de pruebas paralelas de humedometro o speedy, con el cual se garantiza que se esté dando la medición bajo la humedad del suelo correcta y correspondiente a cada tramo. Siguiendo este patrón de medida para todos los tramos, tanto para las mediciones con geogauge como para las mediciones con cono de arena se culmina con el proceso de toma de datos en campo, el cual luego se tabula y se procesa como una nube de datos en un software conocido como minitab el cual con basado en fundamentos estadísticos



puede relacionar dos series de datos distintas pertenecientes a dos magnitudes diferentes en este caso las magnitudes serian la rigidez del suelo medida con el geogauge y la otra seria la densidad del suelo medida con el método del cono de arena, luego de relacionarlas establece que tanto una variable está siendo explicada en función de otra, esta operación se arroja como un modelo matemático que es el que conocemos como la correlación estadística, la cual nos permitió reproducir valores medidos de rigidez y obtener a través de esta valores de densidad.

## ABSTRACT

In the following lines which will be summarized in detail the process was run to achieve the main objective of this research.

To carry out the development of a correlation statistic need of a number of field measurements obtained through the implementation of each of the methods well as sand cone as geogauge, which gave us the necessary information for establishing the degree of concordance between the measured density with the sand cone stiffness and measured with geogauge. This required first characterize the soil with which trabao through laboratory tests such as, grain size, sand cone test, test geogauge, modified proctor test, CBR test. After having the basic characteristics of the soil, proceeded to build five equal-sized square sections, in this case the sections were built two meters long and two meters wide, with a thickness of 15 cm, each starting with different humidity humidity of 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, each leg is compact with a device known as a mini road roller type "frog", making the establishment of a uniform and continuous layer effects have a high quality measurement with both methods.

After the first section built proceeded to take measurements, built each section was taken under the following parameter measurements, 20 measurements with each method geogauge 3 measurements with sand cone, this process must be repeated for each of the 5 sections that were prepared with different humidities. Since the sections were square was due to follow a common pattern for measurement, this pattern measurement type is described as "snail" is, was chosen one of the four corners of the stage and starts with geogauge measurements one after another about 40 cm away from each other in sequence from the outermost part of the section on directions clockwise, towards the inner part of the leg or center, resulting in a spiral. During this process goes moisture controlling materials through parallel testing of humedometro or speedy, with which ensures that the measurement is being given under the correct soil moisture and for each tranche. Following this standard measure for all sections for both measurements with measurements geogauge to sand cone culminates making process field data, which is then tabulated and processed as a cloud data Minitab software known as

which with based on statistical foundations can relate two different data sets from two different magnitudes in this case would be the magnitudes measured soil stiffness with another serious geogauge and soil density measured by the method sand cone, after which both relate sets a variable function being explained in another, this operation is thrown as a mathematical model is known as is the statistical correlation, which allowed us to reproduce the measured values of rigidity and obtain through this density values.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Págs.</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	23
1.1 METODOLOGÍA DEL PROYECTO .....	23
1.1 METODOLOGÍA DEL PROYECTO .....	24
1.2 OBJETIVOS.....	25
1.2.1 Objetivo General. ....	25
1.2.2 Objetivos Específicos. ....	25
1.3 CONTRIBUCION .....	25
1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	26
2. MARCO CONCEPTUAL.....	27
2.1 DESCRIPCION DEL ESCENARIO Y NORMATIVA QUE ENMARCA LA INVESTIGACION .....	27
2.1.1 Densidad del terreno .....	28
2.1.2 Ensayos de caracterización del material .....	29
2.1.2.1 Ensayo de granulometría .....	29
2.1.2.1 Ensayo de granulometría .....	30
2.1.2.1 Ensayo de granulometría .....	31
Ecuación 1. Coeficiente de uniformidad.....	31
Ecuación 2. Coeficiente de concavidad o curvatura. ....	31
2.1.2.1 Ensayo de granulometría .....	32
Ecuación 3. Módulo de finura.....	32
2.1.2.1 Ensayo de granulometría .....	33
2.1.2.2 Ensayo Proctor.....	34
2.1.2.2 Ensayo Proctor.....	35
Figura 2-1. Principios de compactación .....	35
2.1.2.2 Ensayo Proctor.....	36
Ecuación 4. Peso específico seco. ....	36

Ecuación 5. Peso específico.....	36
2.1.2.2  Ensayo Proctor.....	37
Ecuación 6. Prueba proctor estándar.....	37
2.1.2.2  Ensayo Proctor.....	38
Figura 2-2. Equipo de la prueba Proctor estándar: a) molde; b) pisón.....	38
2.1.2.2  Ensayo Proctor.....	39
Ecuación 7. Peso específico seco máximo contenido de agua con cero vacíos de aire.....	39
2.1.2.2  Ensayo Proctor.....	40
2.1.2.2  Ensayo Proctor.....	41
Ecuación 8. Energía de compactación por volumen unitario de suelo.....	41
2.1.2.3  Ensayo C.B.R Ensayo de la Relación de Soporte California (CBR).....	42
2.1.2.3  Ensayo C.B.R Ensayo de la Relación de Soporte California (CBR).....	43
Ecuación 9. Obtención CBR. ....	43
2.1.2.3  Ensayo C.B.R Ensayo de la Relación de Soporte California (CBR).....	44
2.1.2.3  Ensayo C.B.R Ensayo de la Relación de Soporte California (CBR).....	45
2.1.2.3  Ensayo C.B.R Ensayo de la Relación de Soporte California (CBR).....	46
2.1.2.4  Métodos normalizados y no normalizados para determinar la densidad de los suelos. ....	47
2.1.2.5  Método del Cono de Arena .....	48
2.1.2.5  Método del Cono de Arena .....	49
2.1.2.5  Método del Cono de Arena .....	50
2.1.2.5  Método del Cono de Arena .....	51
Figura 2-5. Aparato del cono de arena. ....	51
2.1.2.6  Ensayo de Medición de Rigidez por el Método “GEOGAUGE” .....	52
2.1.2.6  Ensayo de Medición de Rigidez por el Método “GEOGAUGE” .....	53
2.1.2.6  Ensayo de Medición de Rigidez por el Método “GEOGAUGE” .....	54
2.1.2.6  Ensayo de Medición de Rigidez por el Método “GEOGAUGE” .....	55
2.1.2.6  Ensayo de Medición de Rigidez por el Método “GEOGAUGE” .....	56
Tabla 2. Tabla de especificaciones.....	56
2.2  REGRESION LINEAL SIMPLE Y ANOVA .....	57
2.2.1  Generalidades.....	57

Figura 2-7. Vista del shaker. ....	57
2.2.2 Regresión lineal simple. ....	58
2.2.2 Regresión lineal simple. ....	59
Ecuación 10. Modelo determinista lineal o verdadera recta de regresión modificado con la inclusión del término probabilístico.....	59
Ecuación 11. Modelo probabilístico lineal con anotaciones del valor esperado.....	59
Ecuación 12. $\mu_{y.x^*} = E(\beta_0 + \beta_1 x^* + \epsilon) = \beta_0 + \beta_1 x^* + E(\epsilon) = \beta_0 + \beta_1 x^*$ .....	59
2.2.2 Regresión lineal simple. ....	60
Ecuación 13. Altura del punto - altura de la recta. ....	60
Ecuación 14. Sumatoria de las desviaciones verticales.....	60
Ecuación 15. Derivadas parciales con respecto a $b_0$ .....	60
Ecuación 16. Derivadas parciales con respecto a $b_1$ .....	60
2.2.2 Regresión lineal simple. ....	61
Ecuación 17. Ecuaciones normales por resolución de términos. ....	61
Ecuación 18. Ecuaciones normales por resolución de términos. ....	61
Ecuación 19. Solución sistema de ecuaciones con $b_1$ .....	61
Ecuación 20. Solución sistema de ecuaciones con $b_0$ .....	61
2.2.2 Regresión lineal simple. ....	62
Ecuación 21. Suma de cuadrados del error representados por SSE.....	62
Ecuación 22. Estimación de $\sigma$ .....	62
Ecuación 23. Forma de computar el valor SSE .....	62
2.2.2 Regresión lineal simple. ....	63
Ecuación 24. Ingresando SST como nuevo término. ....	63
Ecuación 25. Cálculo magnitud de la variación por el modelo de regresión lineal. ....	63
2.2.3 Análisis de varianza. ....	64
2.2.3 Análisis de varianza. ....	65
Ecuación 26. Hipótesis de interés.....	65
Ecuación 27. Representación medias muestrales individuales. ....	65
2.2.3 Análisis de varianza. ....	66
Tabla 3. Tabla ANOVA. ....	67
3. ESTIMACION DE LA CORRELACION ENTRE EL METODO DE CONO DE ARENA Y EL METODO GEOGAUGE .....	68
3.1 RESUMEN METODOLÓGICO.....	68
3.2 ECUACIÓN DE ESTIMACIÓN .....	69
3.3 CORRELACION RIGIDEZ Y CONTENIDO DE HUMEDAD.....	69

Ecuación 28. Estimación densidad seca (Humboldt, año) .....	69
3.3 CORRELACION RIGIDEZ Y CONTENIDO DE HUMEDAD .....	70
Tabla 3. Valores experimentales medidos en campo. ....	70
Tabla 4. Valores determinados para C, de datos experimentales medidos en campo .....	70
Ecuación 29. Correlación rigidez y contenido de humedad. ....	70
Ecuación 30. Modelo de cálculo para determinación de los C del terreno.....	70
3.3 CORRELACION RIGIDEZ Y CONTENIDO DE HUMEDAD .....	71
Figura 3-1. Correlación entre valores C y la relación $K/m^{0,25}$ medidos en el terreno analizado. ....	71
3.4 ANALISIS ESTADISTICO CORRELACION RIGIDEZ Y CONTENIDO DE HUMEDAD .....	72
Figura 3-2. Gráficos de residuos para C del terreno, análisis de criterios de validez de la regresión .....	72
3.4 ANALISIS ESTADISTICO CORRELACION RIGIDEZ Y CONTENIDO DE HUMEDAD .....	73
Figura 3-3. Correlación entre valores C y la relación $K/m^{0,25}$ transformados. ....	73
3.4 ANALISIS ESTADISTICO CORRELACION RIGIDEZ Y CONTENIDO DE HUMEDAD .....	74
Figura 3-4. Gráficos de residuos para variable C del terreno, transformada. ....	74
Ecuación 31. Nueva ecuación del modelo ajustado de regresión.....	74
3.5 CORRELACION DE LA DENSIDAD SECA DEL SUELO.....	75
Tabla 5. Resumen estadístico ANOVA .....	75
3.5 CORRELACION DE LA DENSIDAD SECA DEL SUELO.....	76
Tabla 6. Valores estimados para densidad seca a partir de datos experimentales obtenidos .....	76
Ecuación 32. Modelo de cálculo para el primer valor.....	76
3.5 CORRELACION DE LA DENSIDAD SECA DEL SUELO.....	77
Figura 3-5. Correlación entre Densidad estimada Ec. Humboldt y la Densidad medida del suelo.....	77
Ecuación 33. Modelo de Correlación Obtenido.....	77
4. ANALISIS ESTADISTICO – MODELO DE CORRELACION OBTENIDO .....	78
Figura 4-1. Gráficos de residuos para Densidad, análisis de criterios de validez del Modelo de correlación obtenido. ....	78
4. ANALISIS ESTADISTICO – MODELO DE CORRELACION OBTENIDO .....	79

Figura 4-2. Grafica de Correlación con variables transformadas entre densidad Estimada Ec. Humboldt y la Densidad medida Cono de arena.....	79
4. ANALISIS ESTADISTICO – MODELO DE CORRELACION OBTENIDO .....	80
Figura 4-3. Gráficos de residuos -Densidad del terreno, transformación Modelo de correlación. ....	80
Ecuación 34. Ecuación Modelo de Correlación Obtenido entre método de Cono de arena y Geogauge. ....	80
4.1 VALIDACIÓN DEL MODELO Y COMPARACIÓN CON VALORES MEDIDOS .....	81
Tabla 7. Resumen estadístico ANOVA para el Modelo de correlación. ....	80
4.1 VALIDACIÓN DEL MODELO Y COMPARACIÓN CON VALORES MEDIDOS .....	82
Tabla 8. Valores estimados para densidad seca a partir del modelo de correlación pGeogauge .....	81
Ecuación 35. Modelo de cálculo a partir del modelo de correlación pGeogauge...	82
4.1 VALIDACIÓN DEL MODELO Y COMPARACIÓN CON VALORES MEDIDOS .....	83
Figura 4-4. Densidad Modelo Geogauge comparada con Densidad medida con Cono de arena. ....	83
4.1 VALIDACIÓN DEL MODELO Y COMPARACIÓN CON VALORES MEDIDOS .....	84
Figura 4-5. Prueba-F de Igualdad de varianzas entre Densidad Geogauge y Cono de arena.....	84
4.1 VALIDACIÓN DEL MODELO Y COMPARACIÓN CON VALORES MEDIDOS .....	85
Figura 4-6. Prueba t-student Diferencias de medias entre Densidad Geogauge y Cono de arena. ....	85
5. ANALISIS DE RESULTADOS Y CONSIDERACIONES DEL PROYECTO.....	86
5.1 RESUMEN DE ENSAYO.....	86
5.1.1 Resultado de Ensayo proctor modificado .....	87
5.1.1 Resultado de Ensayo proctor modificado .....	88
5.1.2 Resultado de Ensayo C.B.R .....	89
5.1.2 Resultado de Ensayo C.B.R .....	90
Tabla 10. Resultado de ensayo granulometría. ....	90
5.1.2 Resultado de Ensayo Granulometria .....	91



Figura 5-4. Curvas granulométrica: Agregado fino. ....	91
Ecuación 36. Granulometría parámetros establecidos por la ASTM.....	91
5.1.3 Resultado Cono de arena .....	92
5.1.4 Resultado Geogauge .....	93
6. CONCLUSIONES .....	94
BIBLIOGRAFÍA.....	95
BIBLIOGRAFÍA.....	96
ANEXOS.....	97
ANEXOS.....	98
ANEXOS.....	99

## LISTA DE TABLAS

**Págs.**

Tabla 2. Tabla de especificaciones.....	56
Tabla 3. Tabla ANOVA. ....	67
Tabla 3. Valores experimentales medidos en campo. ....	70
Tabla 4. Valores determinados para C, de datos experimentales medidos en campo.....	70
Tabla 5. Resumen estadístico ANOVA.....	75
Tabla 6. Valores estimados para densidad seca a partir de datos experimentales obtenidos .....	76
Tabla 7. Resumen estadístico ANOVA para el Modelo de correlación.....	80
Tabla 8. Valores estimados para densidad seca a partir del modelo de correlación pGeogauge.....	81
Tabla 10. Resultado de ensayo granulometría. ....	90

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Págs.</b>
Figura 2-1. Principios de compactación .....	35
Figura 2-2. Equipo de la prueba Proctor estándar: a) molde; b) pisón.....	38
Figura 2-5. Aparato del cono de arena. ....	51
Figura 2-7. Vista del shaker. ....	57
Figura 3-1. Correlación entre valores C y la relación $K/m^{0,25}$ medidos en el terreno analizado. ....	71
Figura 3-2. Gráficos de residuos para C del terreno, análisis de criterios de validez de la regresión .....	72
Figura 3-3. Correlación entre valores C y la relación $K/m^{0,25}$ transformados. ....	73
Figura 3-4. Gráficos de residuos para variable C del terreno, transformada. ....	74
Figura 3-5. Correlación entre Densidad estimada Ec. Humboldt y la Densidad medida del suelo.....	77
Figura 4-1. Gráficos de residuos para Densidad, análisis de criterios de validez del Modelo de correlación obtenido.....	78
Figura 4-2. Grafica de Correlación con variables transformadas entre densidad Estimada Ec. Humboldt y la Densidad medida Cono de arena.....	79
Figura 4-3. Gráficos de residuos -Densidad del terreno, transformación Modelo de correlación. ....	80
Figura 4-4. Densidad Modelo Geogauge comparada con Densidad medida con Cono de arena. ....	83
Figura 4-5. Prueba-F de Igualdad de varianzas entre Densidad Geogauge y Cono de arena.....	84
Figura 4-6. Prueba t-student Diferencias de medias entre Densidad Geogauge y Cono de arena. ....	85
Figura 5-4. Curvas granulométrica: Agregado fino. ....	91

## LISTA DE ECUACIONES

	Págs.
Ecuación 1. Coeficiente de uniformidad.....	31
Ecuación 2. Coeficiente de concavidad o curvatura. ....	31
Ecuación 3. Módulo de finura.....	32
Ecuación 4. Peso específico seco. ....	36
Ecuación 5. Peso específico.....	36
Ecuación 6. Prueba proctor estándar.....	37
Ecuación 7. Peso específico seco máximo contenido de agua con cero vacíos de aire.....	39
Ecuación 8. Energía de compactación por volumen unitario de suelo.....	41
Ecuación 9. Obtención CBR. ....	43
Ecuación 10. Modelo determinista lineal o verdadera recta de regresión modificado con la inclusión del término probabilístico.....	59
Ecuación 11. Modelo probabilístico lineal con anotaciones del valor esperado.....	59
Ecuación 12. $\mu y.x^* = E(\beta_0 + \beta_1 x^* + \epsilon) = \beta_0 + \beta_1 x^* + E(\epsilon) = \beta_0 + \beta_1 x^*$ .....	59
Ecuación 13. Altura del punto - altura de la recta. ....	60
Ecuación 14. Sumatoria de las desviaciones verticales.....	60
Ecuación 15. Derivadas parciales con respecto a $b_0$ .....	60
Ecuación 16. Derivadas parciales con respecto a $b_1$ .....	60
Ecuación 17. Ecuaciones normales por resolución de términos.....	61
Ecuación 18. Ecuaciones normales por resolución de términos.....	61
Ecuación 19. Solución sistema de ecuaciones con $b_1$ .....	61
Ecuación 20. Solución sistema de ecuaciones con $b_0$ .....	61
Ecuación 21. Suma de cuadrados del error representados por SSE.....	62
Ecuación 22. Estimación de $\sigma$ .....	62
Ecuación 23. Forma de computar el valor SSE .....	62
Ecuación 24. Ingresando SST como nuevo término. ....	63
Ecuación 25. Cálculo magnitud de la variación por el modelo de regresión lineal.....	63
Ecuación 26. Hipótesis de interés.....	65
Ecuación 27. Representación medias muestrales individuales. ....	65
Ecuación 28. Estimación densidad seca (Humboldt, año) .....	69
Ecuación 29. Correlación rigidez y contenido de humedad. ....	70
Ecuación 30. Modelo de cálculo para determinación de los C del terreno.....	70

Ecuación 31. Nueva ecuación del modelo ajustado de regresión.....	74
Ecuación 32. Modelo de cálculo para el primer valor.....	76
Ecuación 33. Modelo de Correlación Obtenido.....	77
Ecuación 34. Ecuación Modelo de Correlación Obtenido entre método de Cono de arena y Geogauge. ....	80
Ecuación 35. Modelo de cálculo a partir del modelo de correlación pGeogauge...	82
Ecuación 36. Granulometría parámetros establecidos por la ASTM.....	91

## **TITULO**

**CORRELACION ENTRE EL METODO GEOGAUGE Y EL METODO DEL CONO DE ARENA PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DE UN SUELO GRANULAR EN CAMPO.**

## **1. INTRODUCCIÓN**

A través de una correlación estadística podemos calcular directamente la magnitud de un parámetro cualquiera, por medio de la medición de otro parámetro que este directamente asociado a este. A grandes rasgos esta es la temática que describe la esencia de esta investigación, donde se desarrolló una correlación entre dos métodos utilizados en la construcción de terraplenes y vías para medir características que a pesar de ser distintas tienen una relación directa. Estos métodos son el método del cono de arena que es utilizado para medir la densidad de un material y el método del Geogauge (norma ASTM – D6758) que es utilizado para medir la rigidez. Dado que la rigidez de un material está directamente relacionada con la densidad del mismo material, y dado que en términos prácticos medir la rigidez con el método del geogauge es mucho menos dispendioso que medir la densidad con el método del cono de arena, resulta de mucho interés desarrollar un modelo matemático que proyecte valores medidos de rigidez a valores de densidad. De esta manera obtener un beneficio que se traduce en ahorro de tiempo para determinar la densidad de un suelo o material, que para efectos prácticos de esta investigación se utilizó un material granular.

### **1.1 METODOLOGÍA DEL PROYECTO**

Este trabajo de investigación está enfocado a desarrollar una correlación estadística que relacione la densidad medida con el método del cono de arena y la rigidez medida con el método del geogauge, para posteriormente con un modelo de regresión lineal poder proyectar valores de densidad en función de la rigidez medida con el geogauge. Todo esto partiendo de los estudios realizados por el grupo investigativo de HUMBOLDT, compañía que diseñó el dispositivo y por

ROMAN D. HRYCIW y THOMAS G. THOMANN<sup>1</sup> quienes encabezaron la investigación, y formularon el modelo matemático que involucra directamente la densidad, la rigidez y la humedad para poder establecer la correlación.

Para desarrollar esta investigación fue necesario construir 3 tramos de prueba, diseñados especialmente para este proyecto, se utilizó material granular, en cada uno conformándolos de a dos capas de 15 cm de espesor y se compactaron con vibradores tipo rana.

Se realizan 25 ensayos de rigidez por cada 4 ensayos de densidad en el tramo de prueba, este ensayo se repite para 4 humedades distintas partiendo desde el 5% hasta el 9%, esto con el fin de establecer comparaciones en cuanto al comportamiento o variación de la densidad con respecto a la rigidez.

A través de esta investigación se espera optimizar el proceso de control en la compactación de vías y terraplenes, dado que es mucho más rápido medir la rigidez en campo a través del Geogauge y correlacionar el valor obtenido para conocer la densidad que medir con el cono de arena, y es mucho más seguro que medir con el densímetro nuclear. Además este proyecto puede servir como base para aplicar posteriormente correlaciones para otros tipos de suelos, y para otros parámetros que puedan ser homologados a partir de una medida de rigidez.

La empresa SIERRA PEREZ Y CIA., suministró los medios necesarios como equipos y materiales, esto en conjunto con las series ensayos realizados y con los datos obtenidos en campo y sumado a un análisis estadístico nos permito alcanzar el objetivo del proyecto.

---

<sup>1</sup>“Tomado de *Geogauge guía del usuario modelo H-4140 medidor de rigidez y modulo del suelo cumple con la nueva norma ASTM D6758.*”



## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo General.**

Estimar una correlación entre los métodos de cono de arena y el Geogauge para obtener valores de densidad seca en campo.

### **1.2.2 Objetivos Específicos.**

- Desarrollar este documento como un manual que pueda implementarse para futuras investigaciones.
- Determinar qué tan lineal es la relación de variación entre la rigidez y la humedad.
- Determinar mediante el análisis de varianza ANOVA, si estadísticamente el modelo de correlación entre el método geogauge y el método de cono de arena para determinar la densidad de un suelo es estadísticamente significativo.

## **1.3 CONTRIBUCION**

Esta investigación esta ideada puntualmente para ser aplicada a todas aquellas estructuras conformadas por suelos granulares, es decir que esto aplica primordialmente para vías, pero también puede aplicarse en terrazas, rellenos sanitarios y otros tipos de obras en los que se utilicen material granular de las especificaciones que en esta investigación exponemos.

Ahora bien esta investigación servirá como una guía o manual para todas aquellas aplicaciones de la ingeniería donde se utilice el material en mención.

En contexto con lo explicado en el párrafo anterior, uno de los objetivos de esta investigación es conseguir un proceso de medición de densidad seca en campo de una manera más segura y en menor tiempo por lo tanto siendo más eficientes.

## 1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

- ✓ Capítulo 2: en este capítulo se desglosa todo el marco que contiene los fundamentos teóricos de los ensayos de laboratorio y los fundamentos estadísticos que se utilizaron para lograr el objetivo principal de la investigación.
- ✓ Capítulo 3:  
En el capítulo 3 se describe de manera detallada el procedimiento y metodología para estimar la correlación entre los datos obtenidos por el método del cono de arena y el método del geogauge.
- ✓ Capítulo 4:  
En el capítulo cuatro se especifica cómo se valida el modelo a partir de la correlación ya establecida y se examina a través del ANOVA (análisis de varianza), para corroborar si estadísticamente es confiable.
- Capítulo 5:  
En este capítulo se presenta análisis de resultados de los ensayos practicados tanto para la caracterización del material como los ensayos de cono de arena y de geogauge. Además se contrastan dichos resultados con el fin de establecer si se encuentran dentro de los parámetros normales.

## **2. MARCO CONCEPTUAL**

Dentro de los recursos más importantes en una obra se encuentra el tiempo y el dinero, uno está directamente relacionado con el otro, es por esto que ejecutar procesos de prueba en campo como lo es la verificación de la densidad del suelo, implica que sea un proceso rápido y eficiente. Es por esto que se han ido mejorando los dispositivos que nos permiten determinar parámetros como la densidad, humedad en campo, de una manera rápida. Estos métodos han evolucionado con el pasar del tiempo primero se estableció el balón de goma INV E – 162 – 07 y luego el cono de arena INV E-161 – 07, luego el densímetro nuclear INV E-164 - 07, ahora bien, existen otros métodos como el Geogauge, que se proyecta como herramientas modernas y alternativas para ahorrar tiempo y obtener resultados de una manera segura y eficiente.

Pues bien, luego de este planteamiento es claro que es importante recurrir a nuevas alternativas las cuales nos ayuden a realizar el mismo objetivo de verificar la densidad del suelo en un terraplén o una vía pero utilizando mejor el recurso del tiempo, es para esto que se está llevando a cabo esta investigación dado que así podremos mejorar y agregar valor a la ingeniería local.

### **2.1 DESCRIPCION DEL ESCENARIO Y NORMATIVA QUE ENMARCA LA INVESTIGACION**

En Colombia todos los procesos constructivos están regidos por normas técnicas, bien sea por las normas técnicas colombianas refiriéndonos a procesos técnicos. Para el caso específico de las vías se utiliza el manual del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), por lo tanto es importante hacer referencia de la normativa de esta entidad para el sustento teórico de esta investigación.

### 2.1.1 Densidad del terreno

Se entiende por densidad a la cantidad de materia que ocupa un determinado volumen, aplicando este sencillo concepto a los suelos podremos entender que la densidad de los suelos es la medida o la relación de cuanto suelo puede ocupar una medida volumétrica, de lo que se puede deducir que en la medida en que un suelo sea más denso tendrá más suelo en un mismo volumen. Ahora bien, ¿a qué se debe la capacidad de ser más denso o no un material?, la respuesta a este cuestionamiento está en la estructura interna de los suelos, la cual dependiendo del grado de acomodo que tenga permitirá que un suelo se pueda hacer más denso o no, luego de un proceso donde se le aplique un esfuerzo, esto con el fin de sacar del interior del suelo el aire que pueda encontrarse entre su estructura interna. Si generalmente en la construcción la aplicación del esfuerzo se realiza a través de un equipo denominado compactador. Ahora, el suelo necesita de cierta lubricación para que sus partículas internas puedan alcanzar un grado de acomodo tal que el suelo logre su máximo punto de densificación, esta lubricación se logra por medio del adicionamiento de agua al suelo.

Para obras viales la densidad debe cumplir por norma, lo establecido por el INVIAS en el artículo 330 que dice que el grado de compactación de la capa de material debe ser equivalente al 95% del valor que dio como resultado la prueba *proctor* en laboratorio, esto se constata por medio de la medición *in situ* de la densidad por medio de los métodos ya antes mencionados. Si no se logra obtener el 95% o más en porcentaje de compactación se deberá agregar agua o dejar secar el material dependiendo de la situación o aumentar la energía de compactación y con el fin de generar un mejor reacomodo de las partículas internas del suelo, de esta manera podrá haber una mejor densificación del material, y así posiblemente alcanzar lo establecido por la norma. (Braja, 2012)

### **2.1.2 Ensayos de caracterización del material**

Con el fin de conocer las características fisicoquímicas de un material en este caso de un suelo, se deben realizar una serie de ensayos de laboratorio que nos ayudaran a establecer las capacidades y bondades físicas de dicho material, a continuación relacionamos los ensayos necesarios para estimar los parámetros o propiedades más relevantes del material con el que se desarrolló esta investigación.

#### **2.1.2.1 Ensayo de granulometría**

Las características físicas y la apariencia de un suelo dependen principalmente de la distribución del tamaño de las partículas en el depósito de suelo.

El análisis de la distribución de las partículas sólidas de un suelo por su tamaño es importante para la clasificación de estos, sobre todo para suelos gruesos. Si bien es cierto que la clasificación de un suelo no se puede hacer considerando sólo este aspecto, también lo es que los sistemas de clasificación más utilizados (como el sistema de clasificación de la AASHTO y la USC) y conocidos tienen en cuenta éste método de análisis como parte importante para el comienzo de un análisis más detallado del mismo.

El método de granulometría por tamizado sirve para determinar si el suelo estudiado está compuesto mayormente por partículas gruesas o finas, y para conocer el porcentaje de estas partículas que dicho suelo presenta.

Existen varias clasificaciones, en este documento tomaremos en cuenta dos sistemas de clasificación de suelos, el de la AASHTO y del USC, ambos para determinar el tipo de suelo al que pertenece la muestra estudiada.

El análisis granulométrico es un intento por determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de grano presentes en una masa de suelo dada.

Para lograr esto se obtiene la cantidad que pasa a través de un tamiz con una malla dada pero que es retenido en un siguiente tamiz cuya malla tiene diámetros ligeramente menores a la anterior y se relaciona esta cantidad retenida con el total de la muestra pasa por los tamices. El material retenido de esta forma en cualquier tamiz consiste en que las partículas tienen un tamaño mayor al tamaño de la malla a través de la cual todo el material pasó pero menores al tamaño de la malla del tamiz anterior.

Los tamices son hechos de malla de alambre forjado con aberturas rectangulares que varían en tamaño desde 101.6 mm (4") en la serie más gruesa hasta el N°400 (0.038 mm) en la serie correspondiente al suelo fino. El tamiz N° 200 (0.075mm) es el tamiz más pequeño en la práctica. Para mallas de tamaño inferior al de este tamiz es difícil permitir el paso libre de los suelos.

Los sistemas de clasificación USC y AASHTO Todos los sistemas de clasificación utilizan el tamiz N° 200 como punto divisorio.

La información obtenida en el análisis granulométrico se presenta en forma de curva relacionando los tamaños de las partículas con el porcentaje que pasa en cada tamiz. Esta representación se hace a una escala semi-logarítmica, colocando al porcentaje que pasa como la ordenada en escala natural y los diámetros de las partículas en escalas logarítmica.

La serie de tamices (comúnmente 6 o 7) consiste generalmente de un grupo seleccionado de forma que la abertura de la malla de cada tamiz sea el doble de la abertura de la malla anterior de abajo hacia arriba.

A partir de la curva de distribución granulométrica se pueden obtener diámetros característicos tales como el  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{60}$ . El D se refiere al tamaño del grano, o diámetro aparente, de la partícula de suelo y el subíndice (10, 30, 60) denota el porcentaje de material más fino. EL diámetro  $D_{10}$  es también llamado el **tamaño efectivo** de un suelo.

Una indicación de la variación del tamaño de los diámetros presentes en la muestra se obtiene mediante el **coeficiente de uniformidad**  $C_u$ , definido como:

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Ecuación 1. Coeficiente de uniformidad.

**El coeficiente de concavidad o curvatura  $C_c$**  es una medida de la forma de la curva entre el  $D_{60}$  y el  $D_{10}$  y se define de la siguiente forma:

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}}$$

Ecuación 2. Coeficiente de concavidad o curvatura.

### **Curvas Granulométricas.**

Los resultados de los análisis granulométricos se representan gráficamente en curvas granulométricas. Se representa:

- Abscisas: diámetro de las partículas (log)
- Ordenadas: % en peso de las fracciones.

En la práctica lo que se determina según los métodos indicados, es el peso de la cantidad retenida para cada tamiz y por tanto la fracción que pasa un determinado tamiz, es la suma de todas las fracciones de tamaño menor al ancho de malla de dicho tamiz.

Se suelen representar los porcentajes de suelo que pasan cada tamiz, de manera acumulativa, por lo que la curva suele llamarse **curva granulométrica acumulativa**.

### **Curva Granulométrica Acumulativa.**

En abscisas utiliza los diámetros en escala logarítmica.

En ordenadas representa el % de material que pasa (cernido), o invirtiendo el eje, porcentaje de material que no pasa (retenido). Permite observar cual es la granulometría mayoritaria en el suelo, y como se verá más adelante su clasificación. Asimismo permite observar si un suelo es muy uniforme y continua o por el contrario está bien gradado.

### **Módulo de finura.**

El módulo de finura es un indicativo de la textura del material, es decir de qué tan fina o gruesos son sus agregados, este módulo se estima realizando la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices estándar No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4,  $\frac{3}{4}$ ",  $1\frac{1}{2}$ ", 3" y de 6 y dividiendo el valor entre 100.

$$MF = \frac{\sum \% \text{retenido acumulado No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4, } \frac{3}{4} \text{", } 1\frac{1}{2} \text{", 3", 6"}}{100}$$

Ecuación 3. Módulo de finura.

### **Listado de equipos.**

- Tamices: Instrumento compuesto de un aro y una red que puede ser de tela o cerdas de hilos metálicos para separar granos grandes de otros más finos de un suelo. Para ésta práctica se utilizaron los tamices 4, 8, 10, 16, 30, 40, 50, 100 y 200 (*ver Imagen 1*).
- Horno: Utilizado para secar la muestra de suelo (*ver Imagen 2*).
- Recipientes de aluminio: usados para introducir la muestra en el horno.



## **Metodología.**

1. Preparación de la muestra: Una vez que la muestra llega al Laboratorio lo primero que hicimos fue extenderla sobre bandejas, o simplemente hojas de papel, formando una capa no muy gruesa para facilitar el secado de la misma. Se mantiene el tiempo necesario para equilibrar la humedad de la muestra con la del ambiente, para ello la removimos de vez en cuando para favorecer que todas las caras de los agregados queden expuestas al aire.

Se reconoce que la muestra está seca cuando se desmenuzan sus agregados con formación de abundante polvo, además los agregados al partirse muestran un color uniforme en toda la superficie de fractura.

2. Por lo general se toma una cantidad de la muestra cuyo tamaño depende del muestreo. Que previamente ha sido secada asegurándose que la muestra sea lo más representativa posible.
3. Después la muestra se debe pasar por una serie de tamices o mallas dependiendo del tipo de agregado. En el caso del agregado grueso se pasa por los siguientes tamices en orden descendente (# 4, # 10, # 20, # 40 # 60, # 100, # 200 y Fondo).
4. Se debe calcular el peso del suelo retenido en cada tamiz y en la balanza electrónica. Y luego después de cada pesada se tara la balanza. La cantidad de muestra retenida en cada uno de los tamices representa el peso retenido.
5. Al terminar el proceso y haber calculado todos los pesos retenidos en cada tamiz se deben sumar todos los pesos de material retenido y comparar el total con el peso de la muestra inicial.

Esta operación permite detectar cualquier pérdida de suelo durante el proceso de tamizado. Si se tiene una pérdida de suelo superior al 2% con respecto a la muestra tomada inicialmente se considerará que el ensayo no es satisfactorio y se deberá repetir.

Los porcentajes de grava, arena, limo, y partículas tamaño arcilla presentes en un suelo se obtienen de la curva de distribución granulométrica.

### **Criterios de clasificación según AASHTO y USC.**

Criterios de la USC y la AASHTO:

- Según la clasificación de suelos de la USC, un suelo es fino cuando más del 50% del total de la muestra pasa por el tamiz #200.
- Según la clasificación de suelos de la AASHTO, un suelo es fino cuando más del 36% del total de la muestra pasa por el tamiz #200.

#### **2.1.2.2 Ensayo Proctor**

En la construcción de terraplenes para carreteras, presas de tierra y muchas otras estructuras de la ingeniería, los suelos sueltos deben ser compactados para incrementar sus pesos específicos. La compactación incrementa las características de resistencia de los suelos, aumentando así la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellos. La compactación disminuye también la cantidad de asentamientos indeseables de las estructuras e incrementa la estabilidad de los taludes de los terraplenes. Los rodillos de ruedas lisas, los rodillos patas de cabra, los rodillos con neumáticos de hule y los rodillos vibratorios son usados generalmente en el campo para la compactación del suelo.

Los rodillos vibratorios se usan principalmente para la densificación de los suelos granulares. Este capítulo analiza los principios de la compactación de suelos en el laboratorio y en el campo (Braja, 2000)

### Compactación, principios generales

En general, la compactación es la densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso específico seco. Cuando se agrega agua al suelo durante la compactación, esta actúa como un agente ablandador de las partículas del suelo, que hace que se deslicen entre sí y se muevan a una posición de empaque más denso. El peso específico seco después de la compactación se incrementa primero conforme aumenta el contenido de agua (Figura 2.1). Note que a un contenido de agua  $\omega = 0$ , el peso específico húmedo.

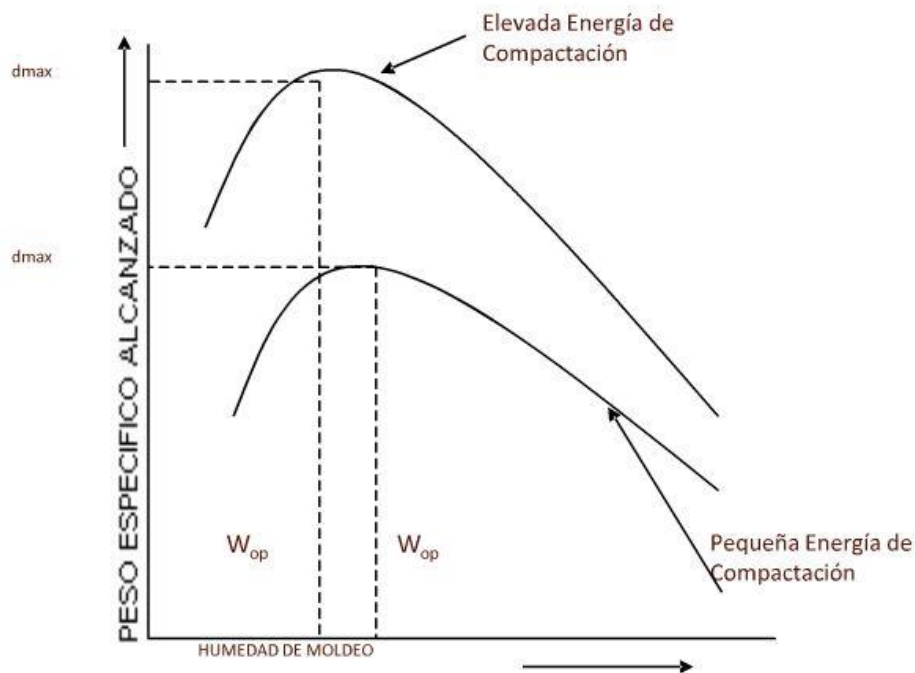


Figura 2-1. Principios de compactación

$(\gamma)$  es igual al peso específico seco ( $\gamma_d$ ) o:

$$\gamma = \gamma_d(\omega = 0) = \gamma_1$$

Ecuación 4. Peso específico seco.

Cuando el contenido de agua es gradualmente incrementado y se usa el mismo esfuerzo compactador para la compactación, el peso de los sólidos del suelo en un volumen unitario crece en forma gradual. Por ejemplo, en  $\omega = \omega_1$  el peso específico húmedo es igual a:

$$\gamma = \gamma_2$$

Sin embargo, el peso específico seco bajo este contenido de agua está dado por:

$$\gamma_d(\omega = \omega_1) = \gamma_d(\omega = 0) + \Delta\gamma_d$$

Ecuación 5. Peso específico.

Más allá de un cierto contenido de agua  $\omega = \omega_2$  (Figura 2.1), cualquier incremento en el contenido de agua tiende a reducir el peso específico seco, debido a que el agua toma los espacios que podrían haber sido ocupados por las partículas sólidas. El contenido de agua bajo el cual se alcanza el máximo peso específico seco se llama contenido de agua óptimo.

La prueba de laboratorio usada generalmente para obtener el peso específico seco máximo de compactación y el contenido de agua óptimo es la prueba Proctor de compactación (Proctor, 1933). Su procedimiento se describe en la siguiente sección.

### **Prueba Proctor modificado.**

En la Prueba Proctor, el suelo es compactado en un molde que tiene un volumen de 944 cm<sup>3</sup>. El diámetro del molde es de 101.6 mm. Durante la prueba de laboratorio, el molde se une a una placa de base en el fondo y a una extensión en la parte superior (Figura 2.2a). El suelo se mezcla con cantidades variables de agua y luego se compacta en 5 capas iguales por medio de un pisón (Figura 2.2b)) que transmite 25 golpes a cada capa. El pisón pesa 4,540 gr y tiene una altura de caída de 457 mm. Para cada prueba, el peso específico húmedo de compactación se calcula como:

$$\gamma = \frac{W}{V(m)}$$

Ecuación 6. Prueba proctor estándar.

Donde:

W = peso del suelo compactado en el molde

V(m) = volumen del molde

Para cada prueba, el contenido de agua del suelo compactado se determina en el laboratorio. Con un contenido de agua conocido, el peso específico seco  $\gamma_d$  se calcula.



Figura 2-2. Equipo de la prueba Proctor modificado: a) molde; b) pisón.

con la ecuación:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{\omega(\%)}{100}}$$

Donde,  $\omega$  ( %) = porcentaje de contenido de agua.

Los valores de  $\gamma_d$  determinados con esta última ecuación se grafican contra los correspondientes contenidos de agua para obtener el peso específico seco máximo y el contenido de agua óptimo para el suelo. Para un contenido de agua dado, el peso específico seco máximo teórico se obtiene cuando no existe aire en los espacios vacíos, es decir, cuando el grado de saturación es igual a 100 %. Así entonces, el peso específico seco máximo a un contenido de agua dado, con cero vacíos de aire se expresa como:

$$\gamma_{zav} = \frac{S_s \gamma_w}{1 + \omega S_s}$$

Ecuación 7. Peso específico seco máximo contenido de agua con cero vacíos de aire.

Para obtener la variación de  $\gamma_{zav}$  con el contenido de agua, use el siguiente procedimiento:

- a) Determine la densidad de los sólidos.
- b) Determine el peso específico del agua  $\gamma_w$ .
- c) Suponga varios valores de  $\omega$ , tales como 5 %, 10 %, 15 %, etc.
- d) Use esta última ecuación para calcular  $\gamma_{zav}$  para varios valores de  $\omega$ .

### **Factores que afectan la compactación**

La sección anterior mostró que el contenido de agua tiene una gran influencia en el grado de compactación logrado para un suelo dado. Además de esto, otros factores importantes que afectan la compactación son el tipo de suelo y el esfuerzo de compactación (energía por volumen unitario). La importancia de cada uno de esos dos factores se describe con más detalle en esta sección.

### **Efectos del tipo de suelo**

El tipo de suelo, es decir, su distribución granulométrica, la forma de los granos del suelo, la densidad de sólidos del suelo y la cantidad y tipo de minerales arcillosos presentes, tiene una gran influencia en el peso específico seco máximo y en el contenido de agua óptimo. La Figura 2.3 muestra curvas típicas de compactación para siete suelos diferentes.

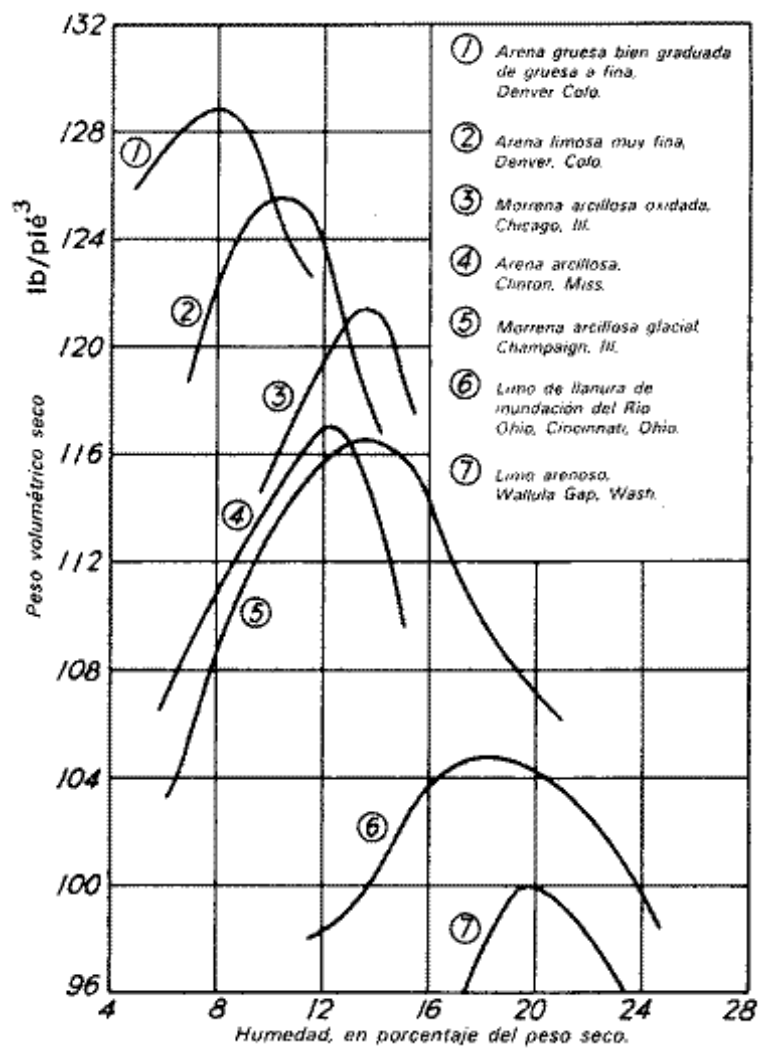


Figura 2-3. Varios tipos de curvas de compactación encontradas en suelos.



### **Efecto del esfuerzo de compactación**

Si el esfuerzo de compactación por volumen unitario de suelo es alterado, la curva de agua-peso específico cambiara también. El molde y pisón de la Proctor modificado se usaron para obtener las curvas de compactación. El número de capas de suelo usadas para compactación fue de tres para todos los casos. Sin embargo, el número de golpes del pisón para cada capa varió entre 20 y 50. De lo anterior, se puede concluir que

- a) Conforme se incrementa el esfuerzo de compactación, el peso específico seco máximo de compactación también aumenta.
- b) Conforme se incrementa el esfuerzo de compactación, el contenido de agua óptimo disminuye en alguna medida.

### **Energía de compactación**

La caída del martillo es de 457.2 mm. El número de golpes de martillo por capa es de 25 como en el caso de la prueba Proctor Modificado. La energía de compactación por volumen unitario de suelo en la prueba modificada se calcula como:

$$E = \frac{(25 \text{ golpes/capa})(5 \text{ capas})(44.5 \times 10^{-3} \text{ kN})(0.4572 \text{ m})}{943.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3}$$

Ecuación 8. Energía de compactación por volumen unitario de suelo.

Debido a que incrementa el esfuerzo de compactación, la prueba Proctor modificada resulta en un incremento del peso específico seco máximo del suelo. El incremento del peso específico seco máximo es acompañado por un decremento del contenido de agua óptimo.

### **Metodología empleada en el laboratorio**

Pulverizamos 3.5 kg de suelo, anteriormente secados al horno, lo suficientemente para que pasara sobre el tamiz N-4; luego, mezclamos con una cantidad necesaria de agua la muestra con el fin de hacer el incremento de humedad en un 4%. Luego, se tomó muestra de este suelo para determinar posteriormente su contenido de humedad.

El molde fue llenado con este suelo húmedo mediante 5 capas. Cada capa de suelo fue compactado con el martillo 25 veces. Se pesa el molde (parte inferior) lleno de suelo húmedo y se dató el peso correspondiente. Este mismo procedimiento se repitió 4 veces (hasta cuando la densidad del suelo bajara significativamente).

#### **2.1.2.3 Ensayo C.B.R Ensayo de la Relación de Soporte California (CBR)**

No basta con especificar el grado de compactación de un suelo. Dos suelos diferentes alcanzarán no solo densidades secas y humedades óptimas diferentes en el ensayo de compactación, sino que el material al estar constituido por partículas diferentes, tendrá un comportamiento en términos de ingeniería diferente. Por ello, se hace necesario un parámetro adicional que considere la capacidad de soporte del suelo en sí mismo para esas condiciones de compactación.

El ensayo de soporte de California se desarrolló por parte de la División de Carreteras de California en 1929 como una forma de clasificar la capacidad de un suelo para ser utilizado como subrasante o material de base en construcción de carreteras.

El ensayo CBR (la ASTM denomina el ensayo simplemente un ensayo de relación de soporte) mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener un número asociado a la capacidad de soporte.

El CBR se obtiene como la relación de la carga unitaria (por pulgada cuadrada) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración dentro de la muestra de suelo compactada a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado. En forma de ecuación, esto se puede expresar como:

$$CBR = \frac{\text{carga unitaria del ensayo}}{\text{carga unitaria patrón}} \times 100 (\%)$$

Ecuación 9. Obtención CBR.

Los ensayos de CBR se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo determinado utilizando el ensayo de compactación estándar (o modificado).

A menudo se compactan dos moldes de suelo: uno para penetración inmediata y otro para penetración después de dejarlo saturar por un periodo de 96 horas; este último se sobrecarga con un peso similar al del pavimento pero en ningún caso menor que 4.5 kg. Es necesario durante este periodo tomar registros de expansión para instantes escogidos arbitrariamente.

En ambos ensayos, se coloca una sobrecarga sobre la muestra de la misma magnitud de la que se utiliza durante el ensayo de expansión. El ensayo sobre la muestra saturada cumple dos propósitos:

1. Dar información sobre la expansión esperada en el suelo bajo la estructura de pavimento cuando el suelo se satura.
2. Dar indicación de la pérdida de resistencia debida a la saturación en el campo.

El ensayo de penetración se lleva a cabo en una máquina de compresión utilizando una velocidad de deformación unitaria de 1.27 mm/min. Se toman lecturas de carga versus penetración cada 0.64 mm de penetración hasta llegar a un valor de 5.0 mm a partir del cual se toman lecturas con velocidades de penetración de 2.5 mm/min hasta obtener una penetración total de 12.7 mm.

El valor del CBR se utiliza para establecer una relación entre el comportamiento de los suelos, principalmente con fines de utilización como base y subrasante bajo pavimentos de carreteras y aeropistas.

### **Equipo**

- Equipo de CBR:
  - Molde de compactación (con collar y base)
  - Disco espaciador
- Martillo de compactación
- Aparato para medir la expansión con deformímetro de carátula con precisión de 0.01 mm
- Pesos para sobrecarga
- Máquina de compresión equipada con pistón de penetración CBR capaz de penetrar a una velocidad de 1.27 mm/min

### **Procedimiento**

1. Preparar una muestra de suelo de grano fino (en cantidad suficiente para hacer 6 probetas) menor que el tamiz # 4, al contenido de humedad óptima del suelo determinado con el ensayo de Proctor Modificado.

2. Antes de compactar el suelo en los moldes, tomar una muestra representativa para determinar su contenido de humedad (por lo menos 100 g si el suelo es de grano fino).
3. Pesar los moldes sin su base ni el collar.
4. Para cada molde ajustar el molde a la base, insertar el disco espaciador en el molde y cubrirlo con un disco de papel filtro.
5. Fabricar 6 probetas de 5 capas cada una: 2 de 12 golpes por capa, 2 de 26 golpes por capa y 2 de 56 golpes por capa; dejar saturando una muestra de 12, de 26 y de 56 golpes por capa.
6. Para cada molde retirar la base, el collar y el disco espaciador, pesar el molde con el suelo compactado y determinara el peso unitario total del suelo.
7. Colocar un disco de papel filtro sobre la base, invertir la muestra y asegurar el molde a la base de forma que el suelo quede en contacto con el papel filtro.

Para muestras no saturadas, llevar a cabo los pasos 8 a 10:

8. Colocar suficientes pesas ranuradas (no menos de 4.5 kg) sobre la muestra de suelo para simular la presión de sobrecarga requerida.
9. Colocar la muestra en la máquina de compresión y sentar el pistón sobre la superficie de suelo utilizando una carga inicial no mayor de 4.5 kg. Fijar el cero en los deformímetro de medida de carga y de penetración (o deformación).

10. Hacer lecturas de deformación o penetración y tomar las respectivas lecturas del deformímetro de carga. Extraer la muestra del molde y tomar dos muestras representativas adicionales para contenido de humedad.

Para muestras saturadas:

11. Colocar la placa perforada con el vástago ajustable sobre el suelo compactado y aplicar suficientes pesas para obtener la sobrecarga deseada, cuidando que no sea inferior a 4.5 kg. Asegurarse de usar un disco de papel filtro entre la base perforada del vástago y el suelo para evitar que el suelo se pegue a la base del vástago.

12. Sumergir el molde y las pesas en un recipiente de agua de forma que el agua tenga acceso tanto a la parte superior como a la parte inferior de la muestra y ajustar el deformímetro de carátula (con lecturas al 0.01 mm) en su respectivo soporte; marcar sobre el molde los puntos donde se apoya el soporte de forma que pueda removerse y volver a colocarlo sobre el molde en el mismo sitio cuando se desee hacer una lectura.

13. Ajustar el cero del deformímetro de expansión y registrar el tiempo de comienzo del ensayo. Tomar las lecturas a 0, 1, 2, 4, 8, 12, 24, 36, 48, 72 y 96 horas de tiempo transcurrido; el ensayo de expansión puede terminarse después de 48 horas si las lecturas en el deformímetro de expansión se mantienen constantes por lo menos durante 24 horas.

14. Al final de las 96 horas de inmersión, sacar la muestra y dejarla drenar por espacio de 15 min; secar completamente la superficie superior de la muestra con toallas de papel.

15. Pesar la muestra sumergida incluyendo el molde.

16. Realizar los pasos 8 al 10 para cada muestra.

17. Tomar muestras para contenido de humedad de las muestras saturadas de la siguiente forma:

2 dentro de los 3 cm superiores del suelo

2 dentro de los 3 cm inferiores del suelo

2 en el centro de la muestra de suelo.

### **Cálculos**

1. Dibujar una curva de resistencia a la penetración en libras por pulgada cuadrada (psi) o kPa versus la penetración en pulgadas o mm. En un mismo gráfico las muestras secas y en otro las muestras saturadas. Dibujar posteriormente estas curvas en un mismo gráfico comparando las resistencias secas y saturadas.
2. Calcular el CBR para una penetración de 0.01 pulgadas (carga patrón 3000 psi) para los 6 ensayos; dibujar en un mismo gráfico la curva CBR (%) versus densidad seca ( $\text{kg/cm}^3$ ), una curva para las muestras secas y otro para las muestras saturadas. Realizar otro gráfico con las mismas características para una penetración de 0.02 pulgadas (carga patrón 4500 psi).

#### **2.1.2.4 Métodos normalizados y no normalizados para determinar la densidad de los suelos.**

A continuación describiremos cada uno de los métodos normalizados y homologados por el INVIAS para determinar la densidad del suelo, así como algunos que aun están en proceso de homologación.

#### **2.1.2.5 Método del Cono de Arena**

Profundizando en el método del cono de arena, podemos resaltar que apunta a ser un método muy práctico de una tecnología muy sencilla, que se basa más que todo en un principio teórico que es el de la relación peso – volumen, al igual que el del balón de goma.

El cono de arena generalmente utiliza una arena especial calibrada, conocida como arena de Ottawa, un elemento metálico en forma de cono y elementos secundarios como espátula, tara, balanza.

Este método es aplicable a todo tipo de suelo que su textura permita que pueda ser excavado, y además que sus porosidades sean más pequeñas que el tamaño más pequeño de la arena de Ottawa con el fin de que las partículas de la arena no se queden dentro de los vacíos naturales del material. Como también no es recomendable utilizar este método en materiales o suelos que estén saturados, suelos blandos o fáciles de pulverizar. INV E-161 – 07

### **Antecedentes.**

Según registros históricos Arquímedes fue el primero en desarrollar el concepto de densidad, Arquímedes apuntaba principalmente a determinar la relación entre el volumen de fluido que se desplaza al sumergir una masa y la masa del cuerpo que se sumerge en dicho fluido.

A finales del siglo XVII cuando se da inicio a una gran era de exploración científica en Europa, cada país apuntaba al estudio de ciencias afines a sus propios intereses, en el caso de Francia e Inglaterra profundizaban en el estudio de los suelos con un fin agrícola, mientras en Alemania basados en los principios de la geología se da la primera institucionalización de lo que sería una escuela que por primera vez estudiaría, definiría y parcialmente caracterizaría los suelos.

En el año de 1833 el científico estadounidense Eugene W. Hilgard contribuye a perfeccionar el estudio de las muestras de suelo en laboratorio basándose en características como la litología superficial, configuración del terreno, vegetación natural, dando paso a que las características de los suelos que hoy en día estudiamos y conocemos en la ingeniería fueran inicialmente medidas en laboratorio.



A partir de los hechos anteriormente descritos, inicia una necesidad de explorar más a fondo las características mecánicas de los suelos, dado que los procesos de expansión y construcción de los países se estaban dando, aunque conceptos como la compactación ya se usaban desde hacía mucho tiempo atrás, solo se conceptualizó matemáticamente bajo modelos matemáticos, después de que se llevaron a cabo pruebas en laboratorios.

### **Equipos y elementos que constituyen el método del cono de arena.**

**Aparato del cono de arena:** El aparato del cono de arena se compone de los siguientes implementos:

- **Frasco:** utensilio necesario para almacenar arena con una capacidad de volumen superior al necesario para llenar el hueco de ensayo y el cono grande apoyado en la platina de base durante el ensayo. Puede ser de aproximadamente 1 galón.
- **Dispositivo desarmable:** un dispositivo ajustable que consiste de una válvula cilíndrica con un orificio de 13 mm de diámetro, instalada en los extremos de los conos o embudos metálicos. La válvula tendrá topes para evitar su rotación cuando este en posición de totalmente abierto o completamente cerrado. El dispositivo se fabricará con metal suficientemente rígido para evitar la distorsión o cambio de volumen del cono grande.
- **Placa de base:** consiste en un plato o placa de metal con un orificio central con una pestaña moldeada, para recibir el embudo grande (cono), el cual se ensambla en dicha pestaña. La placa debe ser de un material rígido. Su superficie de contacto con la superficie del suelo debe ser plana.

- **Arena:** la arena a utilizar debe ser limpia, seca, densidad y gradación uniforme, no cementada, que fluya libremente. Se puede utilizar arenas que tengan un coeficiente de uniformidad ( $D_{60}/D_{10}$ ) inferior a 2, un tamaño máximo de partícula menor a 2 mm y menos del 3% que pase por el tamiz No 60. La arena no se debe reutilizar sin antes ser limpiada de fragmentos del material que se está ensayando, debe dejarse secar al aire y comprobar su densidad.
- **Balanza:** una balanza de 20 kg. y sensibilidad de 5 g como mínimo.
- **Equipo para el secado:** horno o estufa que funcione para secar el material y poder determinar su contenido de humedad.
- **Equipo misceláneo:** un pico pequeño, cincel, destornillador o cuchara para cavar el hueco en el suelo, calculadora, brocha de pintura, formato para anotar datos.

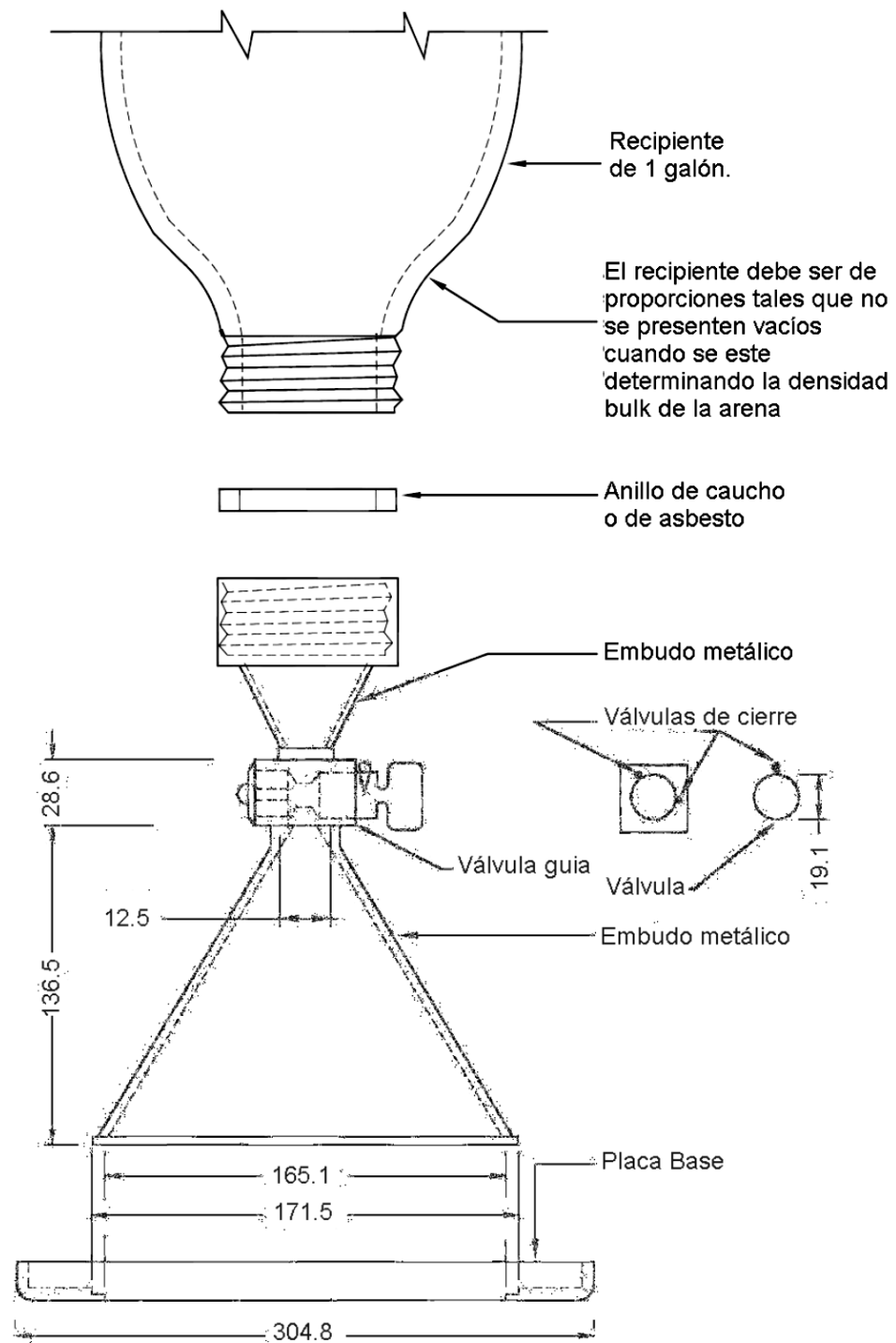


Figura 2-3. Aparato del cono de arena.

#### **2.1.2.6 Ensayo de Medición de Rigidez por el Método “GEOGAUGE”**

##### **Generalidades.**

Todas las construcciones que se realizan están enmarcadas dentro de distintos ámbitos de cumplimiento, tales como el tiempo, la seguridad, el control, entre otros, pero sin duda alguna el tiempo es el más importante, dado que en la ingeniería civil como en muchas disciplinas y profesiones de la vida este implica dinero. El cumplimiento oportuno de los plazos acordados y legalmente pactados para las obras son compromisos que demandan de gran responsabilidad dado que incumplir con ellos acarrearía sobre costos, es por esto que ahorrar tiempo en los procesos tanto de gestión como técnicos a la hora de ejecutar una obra civil es un punto a favor. Debido a esto se han implementado todos los conocimientos en conjunto con la tecnología para diseñar dispositivos que nos permitan a través de ellos salvar tiempo valioso, este es el caso del Geogauge, que no es más que un dispositivo ideado para determinar parámetros como la rigidez del suelo y a través de este la densidad del mismo, lo cual es muy ventajoso para el desarrollo de una obra en donde se da la necesidad de determinar la densidad del suelo compactado o bien sea en otro tipo de obra donde sea necesario determinar el módulo de rigidez del pavimento.

Dadas las características del Geogauge y su sencillo sistema de evaluación que consiste en el concepto básico de emitir cargas a través de un ligero peso, y por medio de sensores mide la deflexión ocasionada por dicho peso, por medio de esta relación se puede obtener el módulo de rigidez de un suelo estipulado.

De esta manera el Geogauge surge como una alternativa para evitar procesos dispendiosos como el de determinar la densidad del suelo por medios convencionales como que funcionan bajo el principio de la relación peso / volumen, o también como alternativa para aquellos métodos que presentan

restricciones dado al manejo de material radioactivo como lo es el densímetro nuclear.

### **Antecedentes.**

En vista de lo anteriormente expuesto acerca de lo poco eficientes en términos de tiempo, que pueden llegar a ser los métodos convencionales para determinar la densidad y otros parámetros del suelo compactado, y en vista de que se busca un método más seguro y rápido, el Federal Highway Administration (FHWA) cuyas siglas en español son *departamento administrativo de carreteras federales* en conjunto con el U.S Department of Defense's Advance Research Program Administration (ARPA) cuyas siglas en español son *Programa Administrativo de Investigación Avanzada del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de norte América* copatrocinan los estudios para desarrollar un dispositivo que surgiera como alternativa a este problema, por lo tanto el (ARPA) autorizo a él (FHWA) para que supervisaran el rediseño de un dispositivo militar que fue creado para localizar minas que estuviesen bajo tierra, por medio de detectores acústicos y sísmicos.

El equipo investigativo estuvo conformado por la compañía de manufacturas HUMBOLDT de Chicago y el grupo BOLT, BERANEK & NEWMAN de Cambridge el resultado de esta unión fue el diseño del (SSG) *Soil Stiffness Gauge*, o medidor de rigidez del suelo, el SSG mide la rigidez del suelo a una tasa de una medición por minuto. Luego al ser patentado el dispositivo adquirió el nombre de Geogauge.

El proceso de medición consiste en la aplicación de unas pequeñas cargas al punto del suelo donde se va a medir la rigidez a través del pie en forma de aro que tiene el dispositivo, al mismo tiempo el dispositivo se encarga de medir las deflexiones en el suelo causadas por estas cargas y relaciona por medio de un algoritmo matemático los resultados obteniendo la rigidez del suelo. se ha

estimado también que con tan solo un  $\pm 5\%$  de precisión respecto a ensayos realizados por densímetros nucleares para determinar la densidad del suelo compactado y a través de tablas de correlación, se pudieron obtener los valores de densidad para dichos suelos.

Se estima que los modelos venideros también tengan medidor de humedad y sistema de posicionamiento global.

Ahora bien entrando en materia de la relación existente entre la densidad seca y la rigidez, el grupo investigativo encabezado por el grupo HUMBOLDT logro establecer lo siguiente:

Humboldt reporto un informe que describía los resultados de la determinación de la densidad a partir de la rigidez, por medio de ensayos paralelos entre el densímetro nuclear y el Geogauge, lo que demostró que el 88% de las densidades estimadas se encontraron dentro del  $\pm 5\%$  de los valores medidos, el 10% de las densidades tomadas se encontraban entre el  $\pm 5\%$  y el 10% de los valores medidos, y que el 2% se encontraba dentro de un rango entre  $\pm 10\%$  y 15% de los valores realmente medidos.

Lo que indico que a través de una correlación matemática se podría alcanzar determinar el valor de la densidad para un suelo, con una gran probabilidad de estar dentro de un  $\pm 5\%$  de los valores reales.

## Equipos y elementos que constituyen el método de Geogauge.



Figura 2-4. Geogauge

- GEOGAUGE: El Geogauge es un dispositivo ideado para medir la rigidez del suelo compactado in situ entre otras funciones, sus características principales son:
  - *Peso:* 11.4 Kg
  - *Diámetro:* 28 cm.
  - *Altura:* 25.4 cm.
  - *Anillo o aro:* es el anillo sobre el cual descansa el dispositivo sobre el suelo, este debe estar colocado sobre toda la superficie del suelo es decir debe de estar en total contacto con esta.
  - *Capacidad de memoria:* El Geogauge tiene una capacidad de almacenar hasta 100 mediciones.

- *Fuente de poder:* la fuente de poder del Geogauge es suministrada por 6 baterías alcalinas tipo “D”.
- *Cable de datos:* el dispositivo incluye un cable por medio del cual se pueden descargar los datos de los ensayos realizados.

Tabla 1. Tabla de especificaciones.

ESPECIFICACIONES TECNICAS			
Rango de Mediciones	Desde	Hasta	
<i>Rigidez</i>	3 (17)	70 (399) MN/m (Klbf/pl)	
<i>Modulo de Young</i>	26.2 (3.8)	610 (89) Mpa (Kpsi)	
<i>Calibración</i>			
<i>Exactitud (%masa real)</i>	< ±1%		
<i>Rango efectivo</i>	4 a 16 MN/m (22.8 a 91.4 Klbf/pulg)		

*Mensajes desplegados:*

- *Stif:* anuncia el valor medido de rigidez en (MN/m).
- *Sd:* indica la desviación estándar de las 25 mediciones de la rigidez a las diferentes frecuencias.
- *Data:* indica que el Geogauge está tomando los datos de rigidez en las diferentes frecuencias.
- *SI-S:* Rigidez en valores en SI, MN/m (mega newton por metro).
- *SI-Y:* El modulo de Young en valores en SI, Mpa (mega pascales).
- *E9-S:* Rigidez, valor en unidades inglesas, Klbf/im. (kilo libras fuerza sobre pulgadas).
- *Eg-Y:* Modulo de Young, valores en unidades inglesas, Ksi o Kpsi (kips por pulgada cuadrada).

*Método de operación:* el dispositivo imparte desplazamientos muy pequeños al suelo a través del “*shaker*” que no es más que una pesa que oscila para generar las vibraciones en el suelo, pues bien los desplazamientos originados son



aproximadamente de 0.00005 pulgadas a 25 frecuencias estables programadas entre 100 y 196 Hz. Luego de esto el dispositivo arroja la rigidez promedio de las 25 frecuencias que fueron evaluadas.

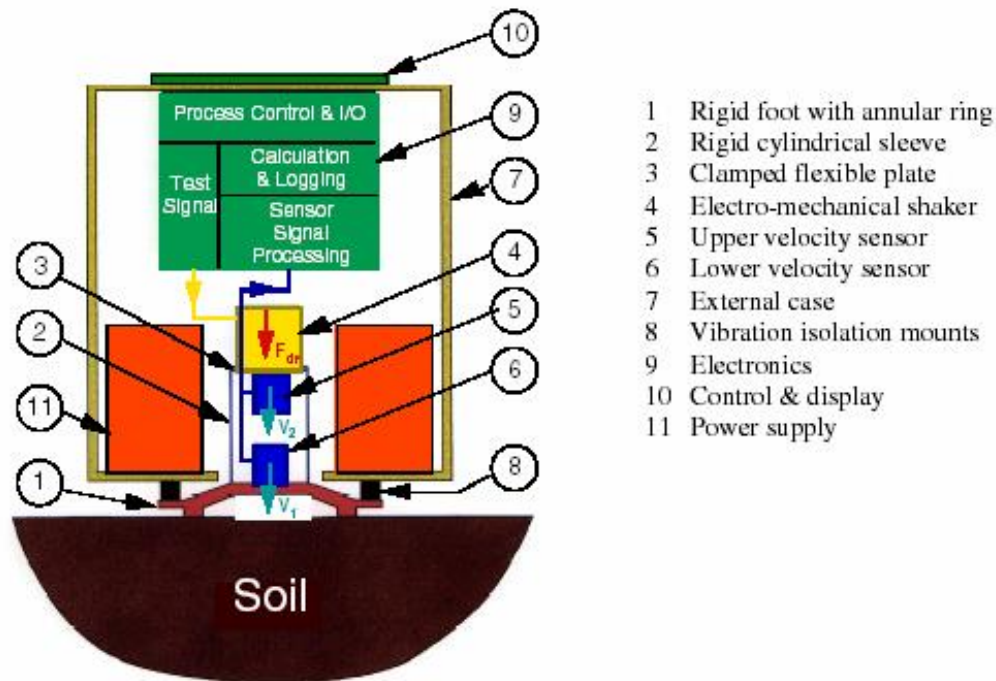


Figura 2-5. Vista del shaker.

## 2.2 REGRESION LINEAL SIMPLE Y ANOVA

### 2.2.1 Generalidades.

El estudio de la estadística para la obtención de un modelo matemático, cuya finalidad sea la de determinar una variable (variable dependiente) mediante una relación con otra variable (variable independiente), consiste en elegir, de una serie de puntos dispersos, plasmados en un plano bivariado (grafico bidimensional de los pares  $p(x, y)$ ), una función que relacione casi perfectamente ambas variables.

Para determinar un modelo de correlación Estadístico de pronóstico confiable, es necesario recurrir a las propiedades de la estadística y la probabilidad, que se reflejan en el análisis de varianza (ANOVA), los modelos de regresión y en la correlación.

### **2.2.2 Regresión lineal simple.**

El análisis de regresión consiste en investigar la relación entre dos o más variables relacionadas de una manera no determinista, mediante procesos estadísticos y probabilísticos. Incluye procedimientos para estimar los parámetros del modelo, tales como, la pendiente y el intercepto, mediante el “principio de mínimos cuadrados”.

También se estiman los parámetros de Varianza y el coeficiente de determinación (cuya medida es la magnitud de relación entre variables). Luego, se realiza la validación del modelo mediante técnicas e inferencia acerca de los parámetros del modelo, llamada prueba de bondad.

**Modelo probabilístico lineal.** La relación matemática determinista más sencilla entre dos variables es una relación lineal (determinista quiere decir que se encuentra especificada por completo). La variable cuyo valor es fijado por el investigador es llamada independiente, predictora o explicativa; la otra variable será aleatoria, a la cual se le llama dependiente o de respuesta.

Realmente en investigaciones, la variable dependiente o de respuesta no se encuentra determinada por completo por la variable independiente y la verdadera recta de regresión no se conoce, debido a una desviación aleatoria en la variable de respuesta. Por tanto, el modelo determinista lineal o verdadera recta de regresión  $y = \beta_0 + \beta_1 x$  es modificado con la inclusión del término probabilístico  $\epsilon$ , denominado desviación aleatoria o termino de error aleatorio.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon$$

Ecuación 10. Modelo determinista lineal o verdadera recta de regresión modificado con la inclusión del término probabilístico.

La cantidad  $\epsilon$  del modelo se supone normalmente distribuida con una sumatoria de valores probables igual a cero, es decir  $E(\epsilon) = 0$ , y una variación equivalente a  $V(\epsilon) = \sigma^2$ .

Para entender mejor los conceptos posteriores se deben realizar las notaciones e implicaciones siguientes:

$\mu_{y.x^*}$  = El valor esperado (o medio) de Y cuando  $x = x^*$

$\sigma_{y.x^*}^2$  = la varianza de Y cuando  $x = x^*$

Entonces se tiene lo siguiente:

$$\mu_{y.x^*} = E(\beta_0 + \beta_1 x^* + \epsilon) = \beta_0 + \beta_1 x^* + E(\epsilon) = \beta_0 + \beta_1 x^*$$

Ecuación 11. Modelo probabilístico lineal con anotaciones del valor esperado.

$$\sigma_{y.x^*}^2 = V(\beta_0 + \beta_1 x^* + \epsilon) = V(\beta_0 + \beta_1 x^*) + V(\epsilon) = 0 + \sigma^2 = \sigma^2$$

$$\text{Ecuación 12. } \mu_{y.x^*} = E(\beta_0 + \beta_1 x^* + \epsilon) = \beta_0 + \beta_1 x^* + E(\epsilon) = \beta_0 + \beta_1 x^*$$

En la figura anterior se muestra la interpretación de suponer que toda la población tratada mantiene una igual desviación estándar, es decir, homogeneidad de varianza, tal cual como se había mencionado en el subcapítulo anterior. También se puede apreciar como la verdadera recta de regresión se encuentra en el medio de la distribución.

**Estimación de parámetros del modelo.** La estimación de los parámetros del modelo se realiza mediante el principio de mínimas cuadrados, el cual se remonta al matemático alemán Gauss (1777 – 1855). A continuación se presenta el respectivo análisis:

**Desviación vertical** del punto  $(x_i, y_i)$  desde la recta  $y = b_0 + b_1x$ :

$$\text{Altura del punto} - \text{altura de la recta} = y_i - (b_0 + b_1x_i)$$

Ecuación 13. Altura del punto - altura de la recta.

**Sumatoria de las desviaciones verticales:**

$$f(b_0, b_1) = \sum_{i=1}^n [y_i - (b_0 + b_1x_i)]^2$$

Ecuación 14. Sumatoria de las desviaciones verticales.

**Derivadas parciales** de  $f(b_0, b_1)$  con respecto a  $b_0$  y  $b_1$ , las cuales se igualan a cero, de manera similar a un cálculo de una sola variable  $f'(b) = 0$ :

$$\frac{df(b_0, b_1)}{db_0} = 2(y_i - b_0 - b_1x_i)(-1) = 0$$

Ecuación 15. Derivadas parciales con respecto a  $b_0$

$$\frac{df(b_0, b_1)}{db_1} = 2(y_i - b_0 - b_1x_i)(-x_i) = 0$$

Ecuación 16. Derivadas parciales con respecto a  $b_1$

Realizando la resolución de términos se obtiene el siguiente sistema de **ecuaciones normales**:

$$nb_0 + (x_i b_1) = y_i$$

Ecuación 17. Ecuaciones normales por resolución de términos.

$$(x_i b_0) + (x_i^2 b_1) = x_i y_i$$

Ecuación 18. Ecuaciones normales por resolución de términos.

Luego, la solución a este sistema de ecuaciones son los valores estimados de  $\beta_0^*$  y  $\beta_1^*$ .

$$b_1 = \beta_1^* = \frac{\sum x_i(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

Ecuación 19. Solución sistema de ecuaciones con  $b_1$

$$b_0 = \beta_0^* = \bar{y} - \beta_1^* \bar{x}$$

Ecuación 20. Solución sistema de ecuaciones con  $b_0$

**Estimación de la Varianza.** La dispersión de los pares  $p(x_i, y_i)$  observados alrededor de la recta verdadera de regresión es medida mediante la varianza representada como  $\sigma^2$ . Debido a que la recta verdadera es desconocida, las desviaciones llamadas también residuos, se determinan mediante la recta estimada, la cual se obtiene en base a los parámetros  $\beta_0^*$  y  $\beta_1^*$ .

Los residuos se obtienen mediante la resta del valor  $y_i$  observados a el valor  $y_i^*$  estimado:  $y_i - y_i^*, \dots, y_n - y_n^*$ .

La estimación de la varianza se obtiene al sumar el cuadrado de todas las desviaciones o residuos y dividir esta cantidad sobre los grados de libertad de la población o tratamiento, que para el caso es el número de observaciones menos dos:  $n-2$  grados de libertad.

**Suma de cuadrados del error.** Equivale a la suma de cuadrados de los residuos y se representa por SSE:

$$SSE = (y_i - y_i^*)^2 = [y_i - b_0^* + b_1^* x_i]^2$$

Ecuación 21. Suma de cuadrados del error representados por SSE

Y la estimación de  $\sigma^2$  es:

$$\sigma^2 = s^2 = SSE / (n-2) = (y_i - y_i^*)^2 / (n-2)$$

Ecuación 22. Estimación de  $\sigma$

Debido a que primeramente se obtuvieron dos términos  $\beta_0^*$  y  $\beta_1^*$  estimados, entonces se dice que se han perdido dos grados de libertad, por lo tanto los grados de libertad de la población o tratamiento quedan definidos por  $n-2$ . Una manera más sencilla de computar el valor SSE se presenta como sigue:

$$SSE = \sum y_i^2 - \beta_0^* \sum y_i - \beta_1^* \sum x_i y_i$$

Ecuación 23. Forma de computar el valor SSE

Esta fórmula es muy sensible a los efectos de redondeo en  $\beta_0^*$  y  $\beta_1^*$ , por lo cual llevar tantos dígitos como sea posible en cálculos intermedios protege contra el error por redondeo.

**Coeficiente de determinación.** El coeficiente de determinación es el valor con el cual se conoce la magnitud con que la variable independiente es explicada por la

variable predictora, mediante el modelo. En la siguiente figura se pueden visualizar tres casos con los cuales se puede calificar el coeficiente de determinación.

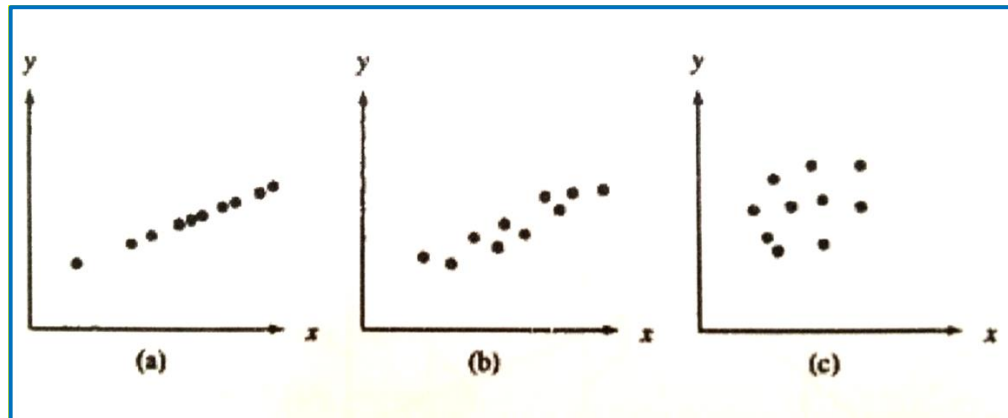


Figura 2.11. (a) datos para los cuales toda variación esta explicada; (b) datos para los cuales la mayor parte de la variación esta explicada; (c) datos para los cuales poca variación esta explicada.

Ingresando un nuevo termino SST denominado suma total de cuadrados, el cual mide la variación de los datos  $y_i$  observados con respecto a su valor medio  $y^*$ . se determina de la siguiente manera:

$$SST = s_{yy} = \sum (y_i - y_i^*)^2 = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}$$

Ecuación 24. Ingresando SST como nuevo término.

Se considera que la variación no explicada por el modelo de regresión lineal se mide mediante el cociente de la suma de cuadrados de error sobre la suma total de cuadrados: **SSE/SST** (en la figura 2.12 se puede apreciar la representación grafica de cada uno de estos términos). Por lo tanto la magnitud de la variación explicada por el modelo de regresión lineal es calculada como sigue:

$$r^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

Ecuación 25. Cálculo magnitud de la variación por el modelo de regresión lineal.

Al valor de  $r^2$  se le llama **coeficiente de determinación**.

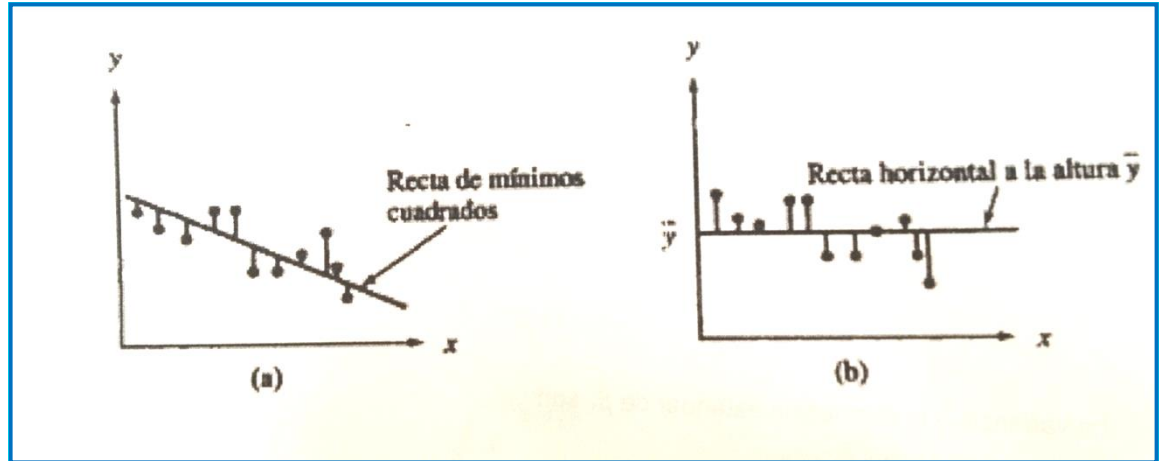


Figura 2-12. (a) SSE suma de desviaciones cuadradas alrededor de la recta de mínimos cuadrados; (b) SST suma de desviaciones cuadradas alrededor de la recta horizontal.

### 2.2.3 Análisis de varianza.

La varianza es una medida de que tan dispersos se encuentran los pares  $p(x, y)$ , del valor medio o de la verdadera recta cuyo valor por lo general es desconocido.

EL ANOVA se refiere al conjunto de situaciones experimentales y procedimientos estadísticos para el análisis de respuestas cuantitativas de unidades experimentales. Aquí se tratara el problema mediante un análisis de varianza ANOVA de un solo criterio.

- i. **ANOVA.** Se utiliza para comparar más de dos medias de tratamientos o poblacionales. Entonces tenemos:

**I** = numero de tratamientos o poblaciones que se comparan.

**$\mu_1$**  = valor medio verdadero del primer tratamiento, o de la población numero uno.



De esta manera se prolonga el valor medio verdadero hasta llegar el valor  $\mu_l$  verdadero del tratamiento.

$\mu_l$  = valor medio verdadero del tratamiento o la población  $l$ .

La hipótesis de interés consiste en afirmar la igualdad de las medias de tratamiento, mediante la hipótesis nula:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots \mu_l$$

Ecuación 26. Hipótesis de interés.

- ii. **notación y suposiciones.** Las notaciones y suposiciones que se emplearan en el desarrollo de la explicación del análisis de varianza de un solo criterio son las siguientes:

$X_{ij}$  = variable aleatoria que representa la  $j$ -ésima medición tomada de la  $i$ -ésima población, o la medición tomada de la  $j$ -ésima unidad experimental que recibe el  $i$ -ésimo tratamiento.

$X_{ij}$  = el valor observado de  $X_{ij}$  cuando se realiza el experimento.

Siendo el caso en que el número de observaciones son iguales para ambos tratamientos o poblaciones, entonces  $I$  significa el número de estos y  $J$  el número de observaciones en cada uno de aquellos. El conjunto de datos consta de  $IJ$  observaciones. Las medias muestrales individuales están representadas por:

$$\bar{X}_l = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J X_{lj}$$

Ecuación 27. Representación medias muestrales individuales.

Donde,  $i = 1, 2, \dots, I$

El punto en el subíndice  $\bar{x}_i$  indica que solo se suman los datos observados de un tratamiento o población. De manera similar se obtiene el promedio de todos los datos observados, denominado gran media:

- iii. **El estadístico de prueba.** Si la hipótesis nula  $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots \mu_I$  es verdadera, es decir que las distribuciones estándar muestrales son las mismas para cada tratamiento o población, entonces, las medias muestrales de cada uno de estos deben estar bastante cercanas, por consiguiente el estadístico de prueba se basa en relacionar los valores medios entre muestras con una medida promedio de la variación que incluya cada una de ellas, se define de la siguiente manera:

Se determina el **estadístico de prueba para ANOVA de un solo criterio** como  **$F = MSTr / MSE$** .

El estadístico de prueba es utilizado esencialmente para verificar la veracidad de la hipótesis nula, afirmando que las medias muestrales son iguales por lo que se encuentran muy cercanas. Pero, si los valores medios entre muestras se encuentran muy dispersos, entonces se genera duda acerca del valor  **$H_0$** , por lo tanto, existe un valor crítico  **$c$** , es decir,  **$(f \geq c)$** . El valor crítico se selecciona mediante la probabilidad  **$P(F \geq c \text{ cuando } H_0 \text{ es verdadera}) = \alpha$** , sea  **$\alpha$**  el nivel de significancia deseado, para llevar a cabo este procedimiento es necesario conocer la distribución de  **$F$**  cuando  **$H_0$**  es verdadera.

- iv. **Las distribuciones F y la prueba F.** la distribución surge al considerar un cociente donde hay grados de libertad asociados con el numerador y otros grados de libertad asociados con el denominador. Se representa con  **$V_1$**  y  **$V_2$**  el número de grados de libertad del numerador y del denominador,

respectivamente, para una variable de distribución F. **Teorema:** siendo  $F = \text{MSTr} / \text{MSE}$  el estadístico de prueba para el ANOVA de un solo criterio y considerando verdadera la hipótesis nula bajo el cumplimiento de las suposiciones expuestas anteriormente, entonces,  $F$  tiene una **distribución F** con:  $V1 = I - 1$  y  $V2 = I (J-1)$ . Representando con  $f$  el valor calculado de estadístico de prueba, se tiene que la región de rechazo se define como:  $f \geq F_{\alpha, V1, V2}$  para una prueba con nivel de significancia  $\alpha$ .

El resultado de los cálculos computados se resume en la tabla de ANOVA de la siguiente manera:

Tabla 2. Tabla ANOVA.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	f
Tratamientos	I-1	SSTr	$\text{MSTr} = \text{SSTr} / (I-1)$	MSTr/MSE
Error	I (J-1)	SSE	$\text{MSE} = \text{SSE} / [I (J-1)]$	
Total	IJ -1	SST		

### **3. ESTIMACION DE LA CORRELACION ENTRE EL METODO DE CONO DE ARENA Y EL METODO GEOGAUGE**

#### **3.1 RESUMEN METODOLÓGICO**

El esquema científico empleado para determinar correlación entre el método del Geogauge y el método del Cono de arena, con el objetivo de realizar la determinación de la densidad seca del suelo del terreno, mediante una estimación estadística con datos experimentales medidos en campo, fue ejecutado bajo el esquema metodológico sugerido por Humboldt, a través de su ecuación de estimación.

La determinación de un modelo de regresión para el valor de C del terreno, entre valores medidos en campo para la rigidez del material y el contenido de humedad del mismo, fue necesaria para el cálculo de parámetros requeridos en la ecuación de estimación.

Finalmente, con la correlación analítica-experimental de estimación para determinar la densidad seca, se relacionaron valores medidos experimentalmente para: rigidez del material, contenido de humedad, relación C determinada para el terreno de las muestras de suelo y densidad ideal del material analizado, a través de la ecuación desarrollada por Humboldt, que posteriormente se sintetizó en un modelo de correlación característico para la determinación de la densidad seca del terreno del material analizado. La validez estadística se realizó siguiendo los criterios de linealidad, homogeneidad de varianzas, independencia de errores y normalidad.; las ecuaciones de correlación obtenidas, se examinaron a través de un análisis de varianza ANOVA.

El desarrollo de las actividades anteriormente mencionadas fue realizado con la asistencia del paquete estadístico, *MINITAB INC.* 15.1.20 Versión 2007, y el paquete de datos de *MICROSOFT EXCEL.* Versión 2007, empleando las herramientas del software que nos permitieron analizar, observar y desarrollar, los objetivos planteados y la validez estadística de los modelos de correlación obtenidos.

### 3.2 ECUACIÓN DE ESTIMACIÓN

La ecuación desarrollada por (Humboldt) fue empleada para realizar la estimación de la densidad seca del suelo, con base en valores obtenidos para rigidez y contenido de humedad en las muestras experimentales (datos medidos en campo), los cuales se correlacionan en la ecuación permitiendo de esta manera la inclusión de dichas variables en cada estimación de la densidad seca obtenida.

$$\rho_D = \frac{\rho_0}{1 + 1,2 \left[ \frac{Cm}{K} - 0,3 \right]^{0,5}}$$

Ecuación 28. Estimación densidad seca (Humboldt, año)

Donde:  $\rho_D$  es la Densidad seca estimada (lb/ft<sup>3</sup>, pcf)

$\rho_0$  es la Densidad ideal (lb/ft<sup>3</sup>, pcf)

$m$  es el contenido de humedad (porcentaje de humedad por peso)/100%

$K$  es la Rigidez (klbf/in)

$C = n(K/m^{0,25}) + b$ ; siendo  $n$  la pendiente y  $b$  el intercepto

### 3.3 CORRELACION RIGIDEZ Y CONTENIDO DE HUMEDAD

A partir de la expresión analítica-experimental desarrollada por Humboldt, podemos determinar los valores para  $C$  de la región del terreno analizada, a partir de los valores medidos en campo, en este caso la rigidez del material, el contenido de humedad del mismo y sustituyendo la  $\rho_D$  por la densidad del terreno analizado mediante el método de Cono de Arena,  $\rho_{CA}$ .

$$C = K/m \left( \left[ \frac{\left( \frac{\rho_0}{\rho_{CA}} - 1 \right)}{1,2} \right]^2 + 0,3 \right)$$

Ecuación 29. Correlación rigidez y contenido de humedad.

Tabla 3. Valores experimentales medidos en campo.

Humedad, $m$	Rigidez, $K$ (klbf/ft)	Densidad seca medida, cono de arena, $\rho_{CA}$ (lb/ft <sup>3</sup> )	Densidad ideal, $\rho_0$ - (lb/ft <sup>3</sup> )
0,05	528,48	130,54	127,80
0,06	723,84	131,48	127,80
0,07	1037,52	137,72	127,80
0,08	687,12	133,54	127,80
0,09	513,00	130,48	127,80

Tabla 4. Valores determinados para C, de datos experimentales medidos en campo

Humedad, $m$	Rigidez, $K$ (klbf/ft)	Densidad seca medida, cono de arena, $\rho_{CA}$ (lb/ft <sup>3</sup> )	Densidad ideal $\rho_0$ (lb/ft <sup>3</sup> )	Valor C del terreno (klbf/ft)	$K/m^{0,25}$
0,05	528,48	130,54	127,80	3174,13	10,1395
0,06	723,84	131,48	127,80	3625,77	10,4803
0,07	1037,52	137,72	127,80	4499,94	11,0338
0,08	687,12	133,54	127,80	2587,72	9,6269
0,09	513,00	130,48	127,80	1711,67	8,6890

Un modelo de cálculo para la determinación de los de C del terreno, se muestra a continuación:

$$C = K/m \left( \left[ \frac{\left( \frac{\rho_0}{\rho_{CA}} - 1 \right)}{1,2} \right]^2 + 0,3 \right) = \frac{528,48}{0,05} \left( \left[ \frac{\left( \frac{127,80}{130,54} - 1 \right)}{1,2} \right]^2 + 0,3 \right) = 3174,13 \text{ klbf/ft}$$

Ecuación 30. Modelo de cálculo para determinación de los C del terreno.

La relación lineal determinada para valores C y la relación  $K/m^{0,25}$ , datos medidos en el terreno analizado, arrojó un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,98$  indicando que la rigidez del material (K) y la variable del contenido de humedad del material (m) poseen una relación significativa evidenciada por la tendencia de los datos analizados.

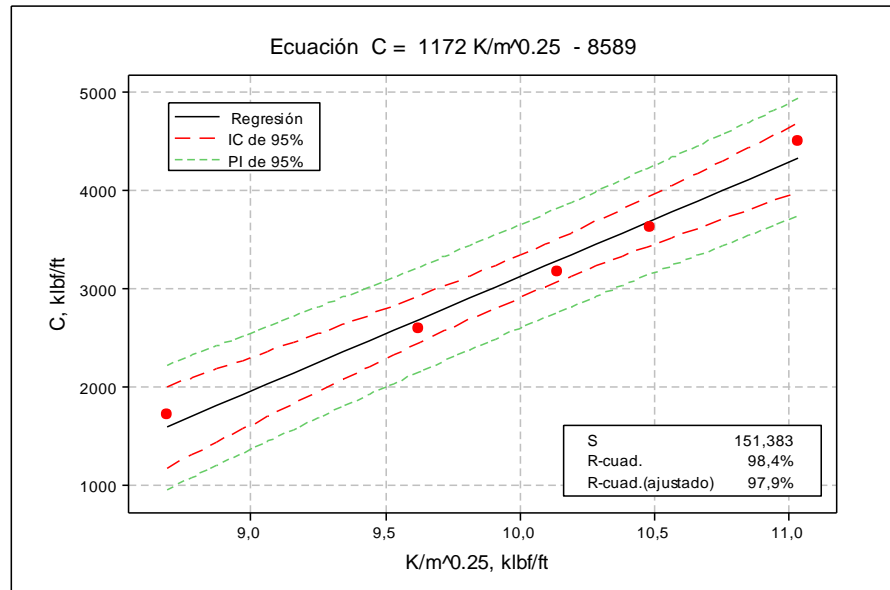


Figura 3-1. Correlación entre valores C y la relación  $K/m^{0,25}$  medidos en el terreno analizado.

En la Figura 3.1, se muestra la correlación obtenida para los datos del terreno analizados - línea (color negro), la línea punteada (color rojo) describe que con un 95% de confianza el intervalo de los datos que se ajustarán caerán en esta región, la línea punteada (color verde) es el intervalo de predicción del 95%, que indica con una confianza del 95% los valores predichos caerán en esta línea. Esta correlación es requerida para realizar la determinación de los valores para la densidad estimada del suelo, la cual se calcula mediante la ecuación antes descrita desarrollada por Humboldt, *Ec.30*.

### 3.4 ANALISIS ESTADISTICO CORRELACION RIGIDEZ Y CONTENIDO DE HUMEDAD

Este análisis tiene como finalidad verificar que la regresión obtenida cumple con los criterios de validez estadísticos que generen confianza para la utilización de los modelos encontrados. Los criterios o supuestos que se tienen en cuenta para la verificación son: linealidad, homogeneidad de varianzas, independencia de errores y normalidad.

Luego de evaluar la adecuación del modelo de regresión, se encontró que: del análisis de la gráfica de probabilidad normal de los residuales siguen una tendencia a los de una distribución normal (ver Figura 3.2). Del análisis de las gráficas de residuales se encontró que presentan homocedasticidad, sin embargo dan muestra de un patrón de comportamiento no lineal, pasando de signo positivo en los extremos y negativo en la parte central, indicando que puede existir presencia de alguna anomalía o algún orden mayor por la forma de los datos.

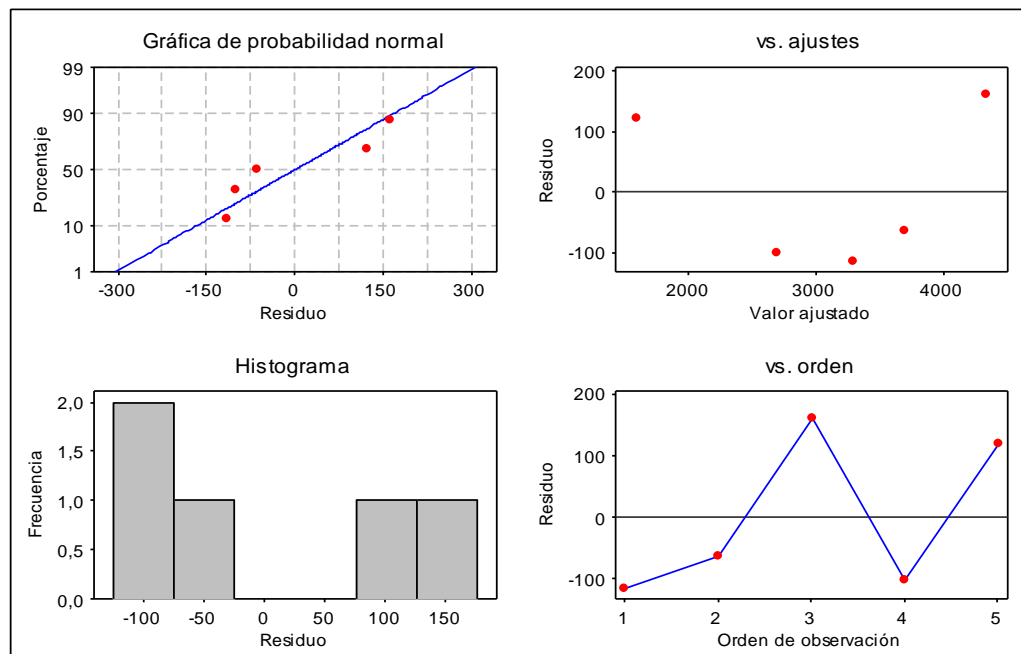


Figura 3-2. Gráficos de residuos para C del terreno, análisis de criterios de validez de la regresión



Por esta razón, se realizó una transformación en los datos para  $(C, K/m^{0,25})$  - se decidió entonces con base en el comportamiento de estos hacia una linearización logarítmica ( $\ln C, \ln (K/m^{0,25})$ ).

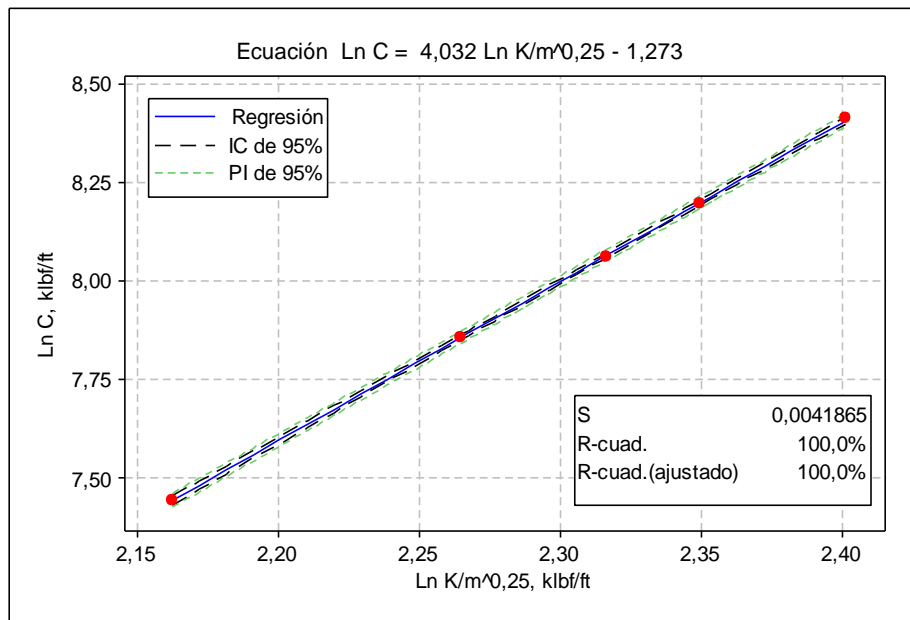


Figura 3-3. Correlación entre valores C y la relación  $K/m^{0,25}$  transformados.

Con la transformación de los datos, se consiguió un comportamiento homocedástico en los residuales y sin tendencia o patrón perceptible, cumpliendo con los supuestos de linealidad, homogeneidad de varianzas, independencia de errores y normalidad.

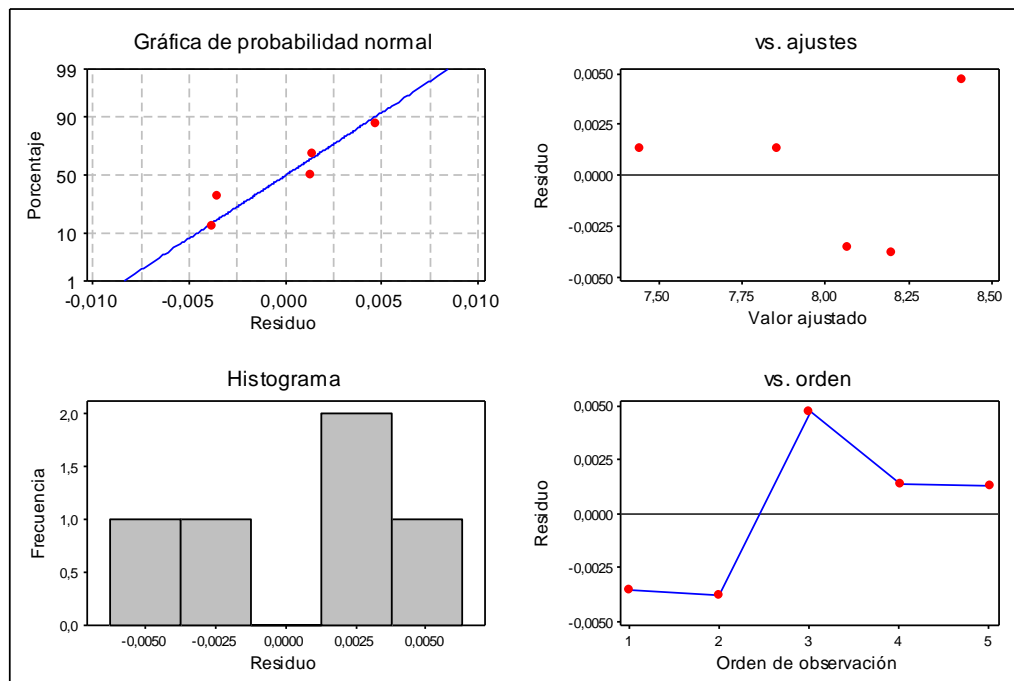


Figura 3-4. Gráficos de residuos para variable C del terreno, transformada.

La nueva ecuación del modelo ajustado de regresión es:

$$C' = 4,032 \left( \frac{K}{m} \right)' - 1,273$$

Dónde:

$n$  = la pendiente correspondiente es ( $n = 4,032$ )

$b$  = el intercepto ( $b = -1,273$ )

$C'$  = Variable transformada ( $\ln C$ )

$(K/m)'$  = Variable transformada ( $\ln (K/m^{0,25})$ )

$C$  será equivalente al ( $e^{C'}$ ) en klbf/ft

Ecuación 31. Nueva ecuación del modelo ajustado de regresión.

Al aplicar la técnica de regresión lineal simple al conjunto de datos ( $C'$  ,  $K/m'$ ), y luego de haber realizado un análisis de varianza ANOVA para la significación de la regresión, se encontró que el coeficiente de determinación R-cuadrado ajustado encontrado para este modelo lineal, indica que con los valores medidos de Rigidez

y humedad del suelo, la regresión logra explicar en un 99,97% la variabilidad en la C del terreno, con una desviación estándar de 0,0041 klbf/ft.

Tabla 5. Resumen estadístico ANOVA

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Intercepto	-1,27284	0,05286	-24,08	0,000
Ln (K/m)'	4,03170	0,02298	175,44	0,000

Análisis de Varianza (ANOVA)					
Fuente	GI	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Valor-P
Regresión	1	0,53948	0,53948	30780,15	0,000
Error residual	3	0,00005	0,00002		
Total	4	0,53953			

Descriptores	
R-cuadrada	100 %
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	99,97 %
Desv. estándar del est.	0,0041865
Estadístico Durbin-Watson	1,58804

Del análisis de varianza realizado ANOVA, se encontró que la regresión lineal simple ajustada es estadísticamente significativa, con un p-valor > 0,05, criterio que le da validez con un 95% de confiabilidad a la regresión obtenida. El estadístico de Durbin-Watson es aproximadamente igual a 1,58 lo que evidencia ausencia de auto correlación entre los errores.

### 3.5 CORRELACION DE LA DENSIDAD SECA DEL SUELO

La estimación para la densidad seca del terreno analizado, se realizó mediante la ecuación de Humboldt, modelo analítico-experimental que relaciona valores medidos experimentalmente para: rigidez del material, contenido de humedad, relación C determinada para el terreno de las muestras de suelo y densidad ideal del terreno analizado.

A partir de la Ec. 30, reemplazando las variables por los valores de datos del terreno tomados en campo, valores mostrados en Tabla 4., se procede estimar la densidad seca del material analizado, a partir de la ecuación de Humboldt.

Un modelo de cálculo para el primer valor es presentado a continuación:

$$\rho_D = \frac{\rho_0}{1 + 1,2 \left[ \frac{Cm}{K} - 0,3 \right]^{0,5}} = \frac{127,80}{1 + 1,2 \left[ \frac{3174,73 * 0,05}{528,48} - 0,3 \right]^{0,5}} = 125,163 \text{ lb/ft}^3$$

Ecuación 32. Modelo de cálculo para el primer valor.

Tabla 6. Valores estimados para densidad seca a partir de datos experimentales obtenidos

Humedad, <i>M</i>	Rigidez, <i>K</i> (klbf/ft)	Densidad ideal $\rho_0$ (lb/ft <sup>3</sup> )	<i>C</i>	Densidad seca estimada Ec. Humboldt, $\rho_D$ (lb/ft <sup>3</sup> )	Densidad seca medida Cono de arena, $\rho_{CA}$ (lb/ft <sup>3</sup> )
0,05	528,45	127,80	3174,13	125,163	130,54
0,06	723,78	127,80	3625,77	124,314	131,48
0,07	1037,46	127,80	4499,94	119,207	137,72
0,08	687,06	127,80	2587,72	122,528	133,54
0,09	512,97	127,80	1711,67	125,220	130,48

Una vez estimado estos valores para la densidad seca  $\rho_D$  (lb/ft<sup>3</sup>), se procedió a determinar si existe correlación entre valores medidos para la densidad seca por el método de cono de arena y los valores estimados relacionados a través de la ecuación de Humboldt.

De las mediciones realizadas por el método del Geogauge para rigidez del material (*K*), y otras variables como: Contenido de humedad (*m*), valor *C* determinado por las variables del terreno (*K*, *m*), y la densidad ideal del terreno analizado ( $\rho_0$ ), se encontró una correlación experimental para la densidad seca del suelo entre el método del Geogauge y el método de determinación del cono de arena.

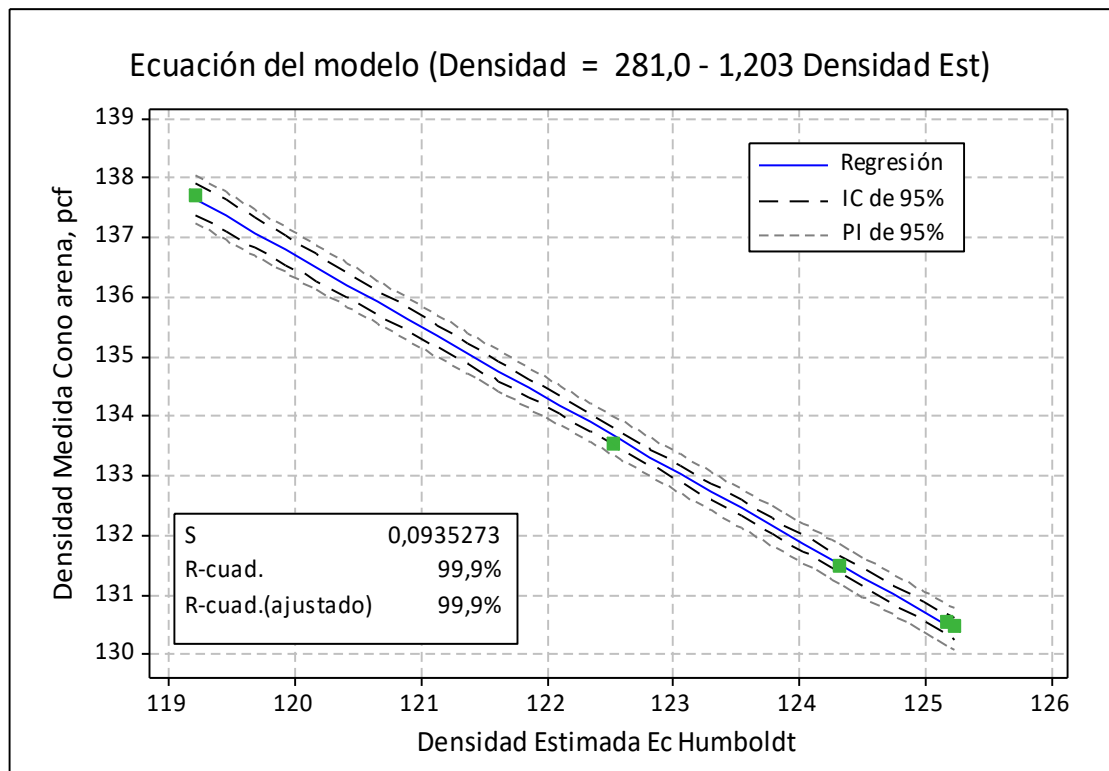


Figura 3-5. Correlación entre Densidad estimada Ec. Humboldt y la Densidad medida del suelo

En la Figura 3.5., se muestra la correlación entre la densidad estimada mediante la ecuación de Humboldt y la densidad medida a través de la determinación por el método de Cono de arena.

A continuación se describe, el modelo de correlación para densidad del suelo entre el Método del Geogauge y el Método de determinación del Cono de arena:

$$\rho_{DHumboldt} = -1,2025(\rho_D) + 281,01$$

Ecuación 33. Modelo de Correlación Obtenido.

Donde:

$\rho_{Geogauge}$  = valor esperado para la Densidad seca (lb/ft<sup>3</sup>)

$\rho_D$  = Densidad estimada (lb/ft<sup>3</sup>), mediante Ec. de Humboldt.

$n$  = pendiente (-1,2025) y  $b$  = intercepto (281,01) del modelo de correlación lineal.

#### 4. ANALISIS ESTADISTICO – MODELO DE CORRELACION OBTENIDO

Luego de evaluar la adecuación del modelo de correlación, se encontró que: del análisis de la gráfica de probabilidad normal de los residuales, estos siguen una tendencia de distribución normal (ver Figura 4.1). Del análisis de las gráficas de residuales se encontró que presentan una dispersión homocedástico, sin embargo dan muestra de un patrón de comportamiento no lineal, pasando de signo positivo en los extremos y negativo en la parte central, indicando que puede existir presencia de alguna anomalía o algún orden mayor por la forma de los datos.

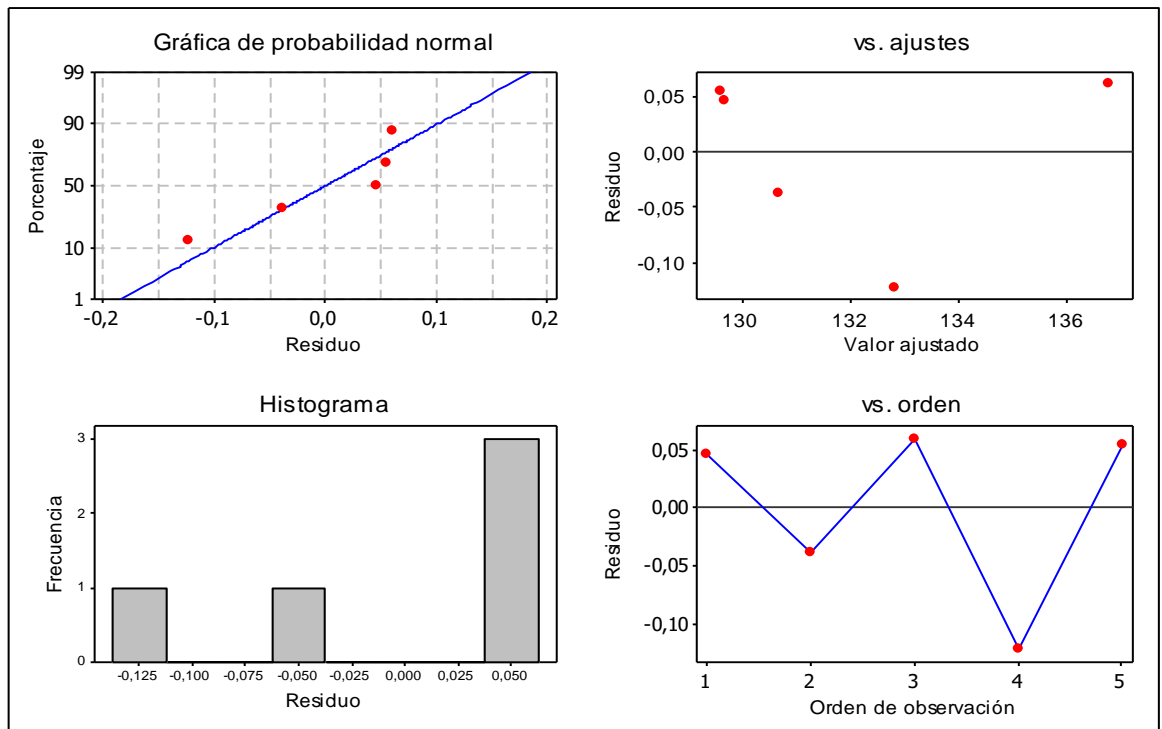


Figura 4-1. Gráficos de residuos para Densidad, análisis de criterios de validez del Modelo de correlación obtenido.

De manera similar se procedió para el tratamiento en particular para esta correlación, sin embargo la transformación realizada en las variables de correlación

Densidad estimada Ecuación de Humboldt y Densidad Medida con Cono de arena ( $\rho_D, \rho_{CA}$ ) respectivamente - se realizó mediante estos pares de datos correlacionados ( $(\rho_{DHumboldt}), (\frac{1}{\rho_{CA}})$ ).

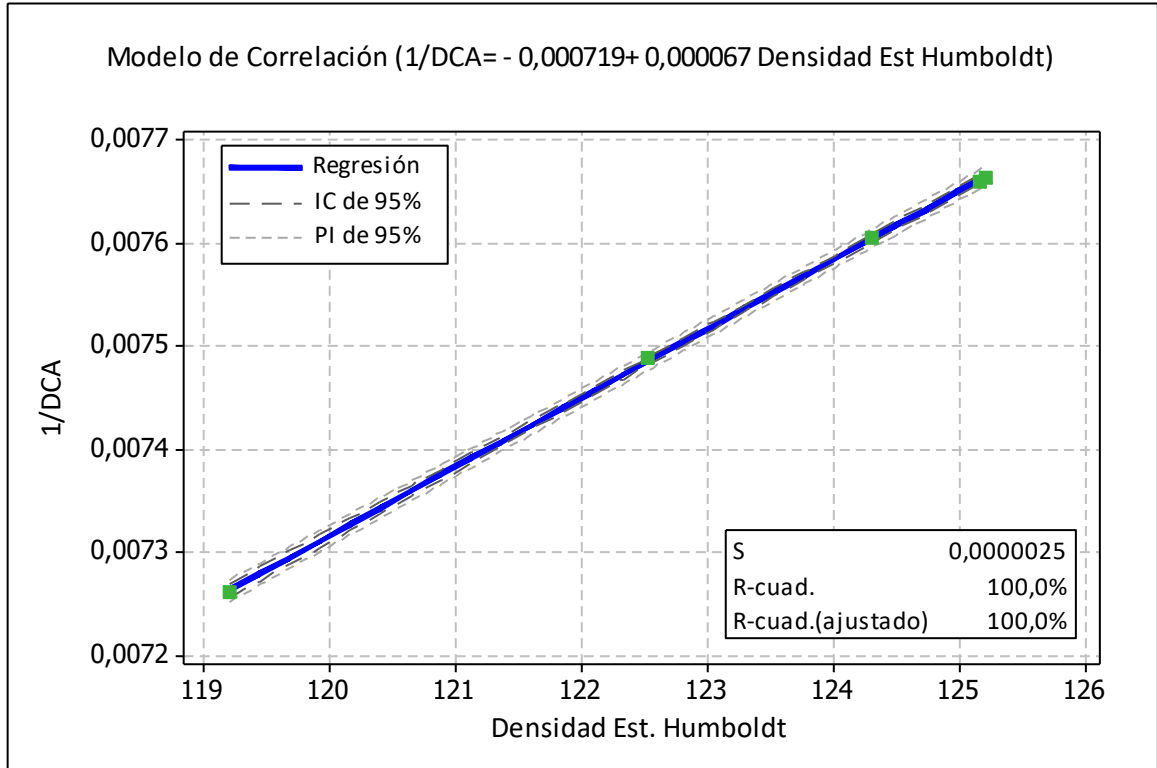


Figura 4-2. Grafica de Correlación con variables transformadas entre densidad Estimada Ec. Humboldt y la Densidad medida Cono de arena.

La nueva ecuación del modelo ajustado de regresión es:

$$\frac{1}{\rho_{Geogauge}} = -0,000719 + 0,000067 * \rho_{DHumboldt}$$

Re-arreglando términos podemos expresarla así

$$\rho_{Geogauge} = \left( \frac{1}{-0,000719 + 0,000067 * \rho_{DHumboldt}} \right)$$

Ecuación 34. Ecuación Modelo de Correlación Obtenido entre método de Cono de arena y Geogauge.

Donde:  $\rho_{Geogauge}$  = valor esperado para la Densidad seca (lb/ft<sup>3</sup>)  
 $\rho_D$  = Densidad estimada (lb/ft<sup>3</sup>), mediante Ec. de Humboldt.  
 $n$  = pendiente (0,000067) y  
 $b$  = intercepto (-0,000719) del modelo de correlación lineal.

En la Figura 4.2., se muestra la correlación entre la densidad estimada mediante la ecuación de Humboldt y la densidad medida a través de la determinación por el método de Cono de arena. Con la transformación de los datos, se consiguió un comportamiento en los residuales, sin tendencia o patrón perceptible, cumpliendo con los supuestos de linealidad, homogeneidad de varianzas, independencia de errores y normalidad.

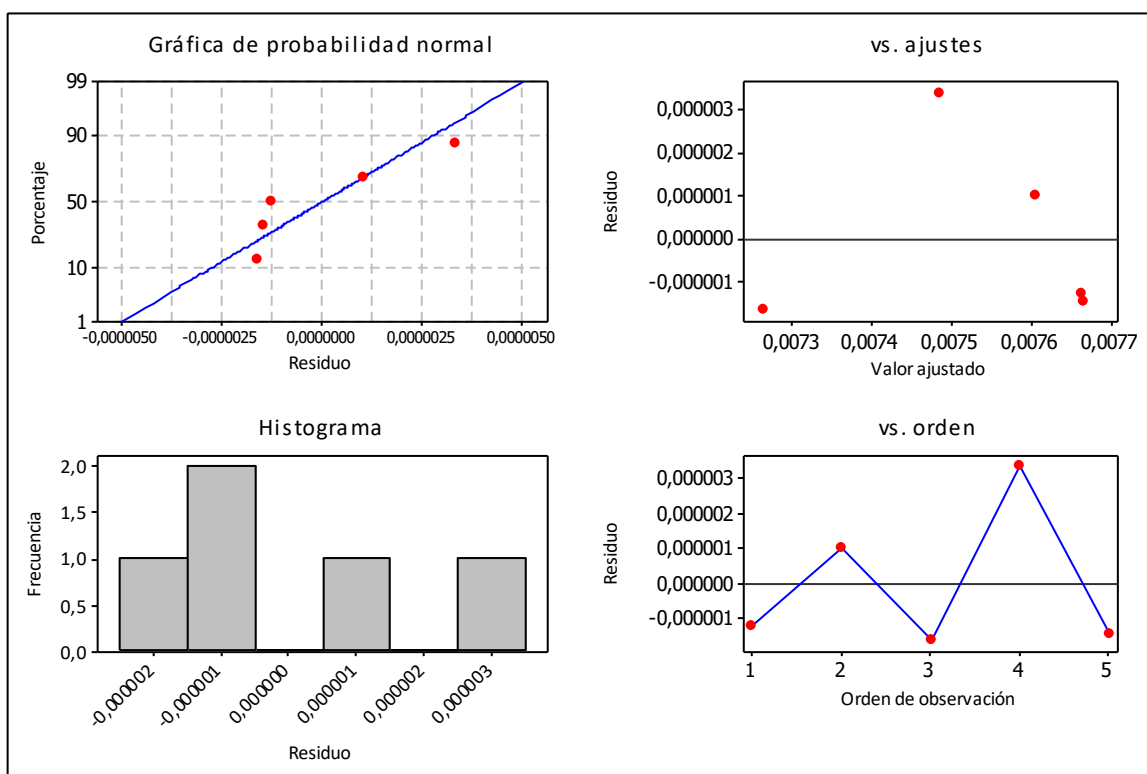


Figura 4-3. Gráficos de residuos -Densidad del terreno, transformación Modelo de correlación.

Tabla 7. Resumen estadístico ANOVA para el Modelo de correlación.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Intercepto	-0,00071927	0,00006089	-11,81	0,001



(ρ <sub>D</sub> )	0,00006696	0,00000049	135,61	0,000	
Análisis de Varianza (ANOVA)					
Fuente	Gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Valor-P
Regresión	1	1,14481E-07	1,14481E-07	18390	0,000
Error residual	3	1,86752E-11	6,22508E-12		
Total	4	1,14500E-07			
Descriptores					
R-cuadrada	100 %				
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	100%				
Desv. estándar del est.	2,49E-06				
Estadístico Durbin-Watson	1.48				

Del análisis de varianza realizado ANOVA, se encontraron suficientes evidencias estadísticas para decir que el modelo de Correlación obtenido del Método Ge gauge y el Método del Cono de arena para determinación de la densidad del suelo es estadísticamente significativo, con un p-valor > 0,05, criterio que le da validez con un 95% de confiabilidad al modelo obtenido. El estadístico de Durbin-Watson es aproximadamente igual a 1,48 lo que evidencia ausencia de auto correlación entre los errores.

#### 4.1 VALIDACIÓN DEL MODELO Y COMPARACIÓN CON VALORES MEDIDOS

Ahora bien, una vez encontrado el modelo de correlación el paso siguiente es la validación de los datos del modelo y su consiguiente comparación con los valores medidos, la determinación de los valores para el modelo de correlación se realiza sustituyendo los valores estimados para la densidad de la ecuación de Humboldt. La validez estadística para comparar los resultados fue efectuado a través de un análisis aplicando una prueba t-student como criterio estadístico.

Tabla 8. Valores estimados para densidad seca a partir del modelo de correlación pGeogauge

Densidad seca estimada Ec. Humboldt, $\rho_D$ (lb/ft <sup>3</sup> )	Densidad seca medida Cono de arena, $\rho_{CA}$ (lb/ft <sup>3</sup> )	Densidad seca determinada Modelo de correlación, $\rho_{Geogauge}$ (lb/ft <sup>3</sup> )
--	--	---

125,163	130,54	130,43
124,314	131,48	131,41
119,207	137,72	137,59
122,528	133,54	133,51
125,220	130,48	130,37

Un modelo de cálculo es presentado a continuación:

$$\rho_{Geogauge} = \left( \frac{1}{-0,000719 + 0,000067 * \rho_{DHumboldt}} \right)$$

$$\rho_{Geogauge} = \left( \frac{1}{-0,000719 + 0,000067 * 125,163} \right) = 130,43 \text{ lb/ft}^3$$

Ecuación 35. Modelo de cálculo a partir del modelo de correlación pGeogauge

En la Figura 4.4., se observa la comparación gráfica entre los valores medidos y estimados mediante los métodos de análisis de Cono de arena y el Modelo de correlación del Geogauge respectivamente, describiendo visualmente para ambos casos los valores y cantidades numérica medida en (*pcf*, *poundcubicfeet*, es decir lb/ft<sup>3</sup>).

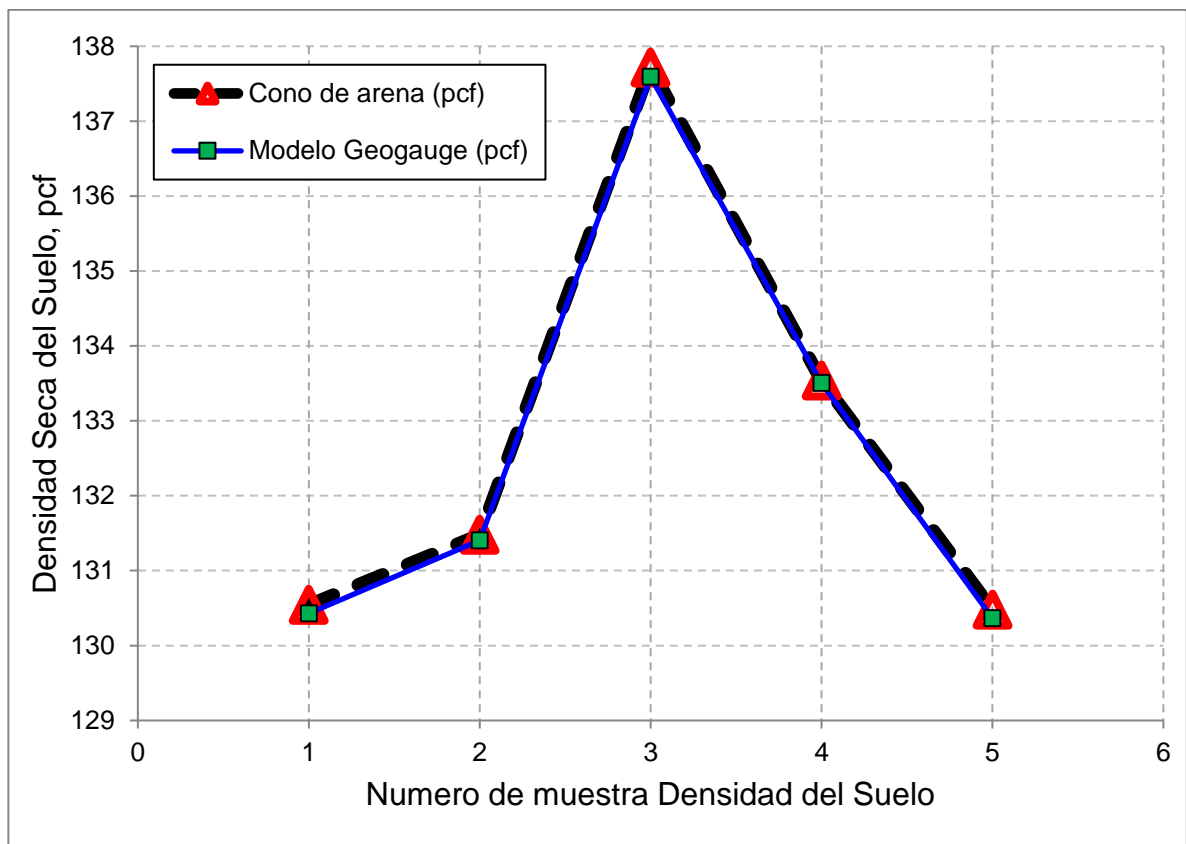


Figura 4-4. Densidad Modelo Geogauge comparada con Densidad medida con Cono de arena.

En este caso, la distancia máxima entre ellas puede apreciarse gráficamente como una separación no pronunciada y despreciable, lo que es de particular interés debido a que quedaría por identificar mediante análisis estadístico si existe diferencia estadísticamente significativa entre varianzas de la muestra (a pesar de que la Figura 4.4, es muy explícita se debe realizar la prueba para corroborar estadísticamente).

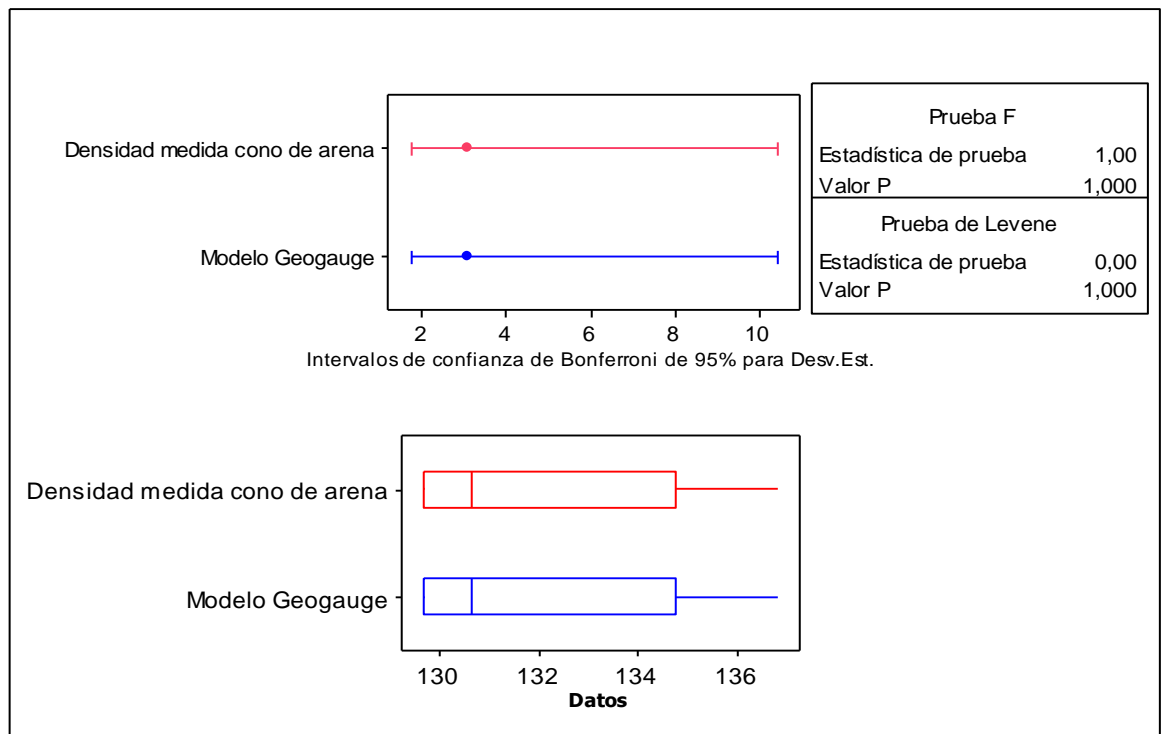


Figura 4-5. Prueba-F de Igualdad de varianzas entre Densidad Geogauge y Cono de arena.

Se realizó una prueba F de igualdad de varianza y Prueba t-student, para comparar las medias y desviaciones estándar en las muestras de interés. En la Figura 4.5 y 4.6., se muestran el resultado de las pruebas de verificación estadística.

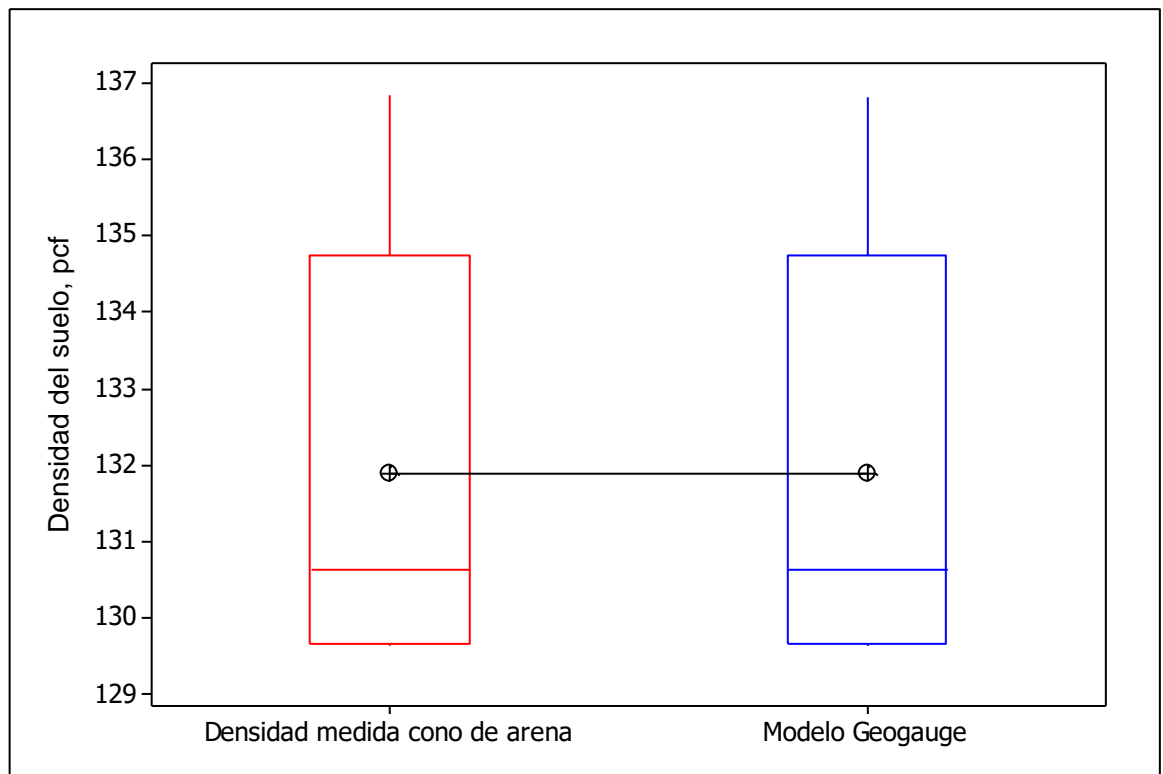


Figura 4-6. Prueba t-student Diferencias de medias entre Densidad Geogauge y Cono de arena.

De las pruebas estadísticas realizadas, se obtuvo que, entre estos dos grupos no se presenta evidencia de diferencias estadísticamente significativas, con un nivel de confianza del 95% en las medidas de varianzas y medias.

## **5. ANALISIS DE RESULTADOS Y CONSIDERACIONES DEL PROYECTO**

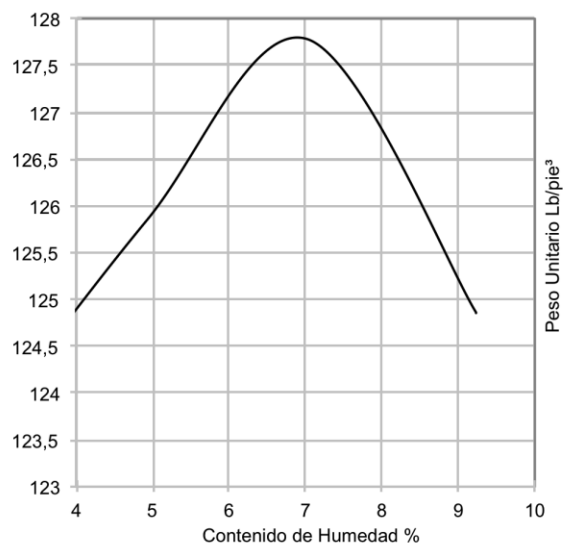
A continuación se realizará un análisis entre las variables que afectan directamente el desarrollo del modelo matemático las cuales son la densidad, humedad y rigidez. Podremos ver cuál es la relación que existe entre cada una de estas variables luego de haber realizado los ensayos en el tramo de prueba.

Además también realizaremos un resumen de los ensayos de caracterización del suelo con el fin de conocer la clase de material con la que se trabajo y la incidencia de sus cualidades en el estudio y desarrollo de este proyecto.

### **5.1 RESUMEN DE ENSAYO.**

Con el objetivo de caracterizar el suelo con el que se trabajo durante el proyecto, se realizaron los siguientes ensayos, de los cuales veremos sus resultados en las siguientes tablas.

ENSAYO DE COMPACTACION					
Descripción MATERIAL GRANULAR					
<b>DENSIDAD</b>					
Molde+Suelo compactado (gr)	7276	7442	7600	7588	
Peso molde (gr)	2983	2983	2983	2983	
Peso suelo compactado (gr)	4293	4459	4617	4605	
Densidad suelo húmedo (gr/cm <sup>3</sup> )	2,038	2,116	2,191	2,186	
Densidad suelo seco (gr/cm <sup>3</sup> )	1,982	2,017	2,048	2,001	
Densidad suelo seco (lbs/pie <sup>3</sup> )	123,6	125,9	127,79	124,9	
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD</b>					
Peso recipiente+suelo húmedo (gr)	240,0	240,0	240,0	240,0	
Peso recipiente+suelo seco (gr)	234,5	230,6	226,9	223,1	
Peso agua evaporada (gr)	5,5	9,4	13,1	16,9	
Peso recipiente (gr)	40,0	40,0	40,0	40,0	
Peso suelo seco (gr)	194,5	190,6	186,9	183,1	
Contenido de humedad (%)	2,8	4,9	7,0	9,2	



Resultados  
Humedad Optima  
Densidad Máxima

7 %  
127,8 Lb/pie<sup>3</sup>

Figura 5-1. Curva granulométrica del material granular.

### 5.1.1 Resultado de Ensayo proctor modificado

El ensayo de proctor modificado arroja los siguientes resultados:

Humedad optima: **7%**.

Densidad seca max en laboratorio: **2048.0 kg/m<sup>3</sup>**.

Por medio de los cuales se puede apreciar una curva de compactación de forma acampanada indicando que la humedad optima se alcanza en 7%. Logrando una compactación máxima seca en laboratorio de 2048 kg/m<sup>3</sup>.



### 5.1.2 Resultado de Ensayo C.B.R

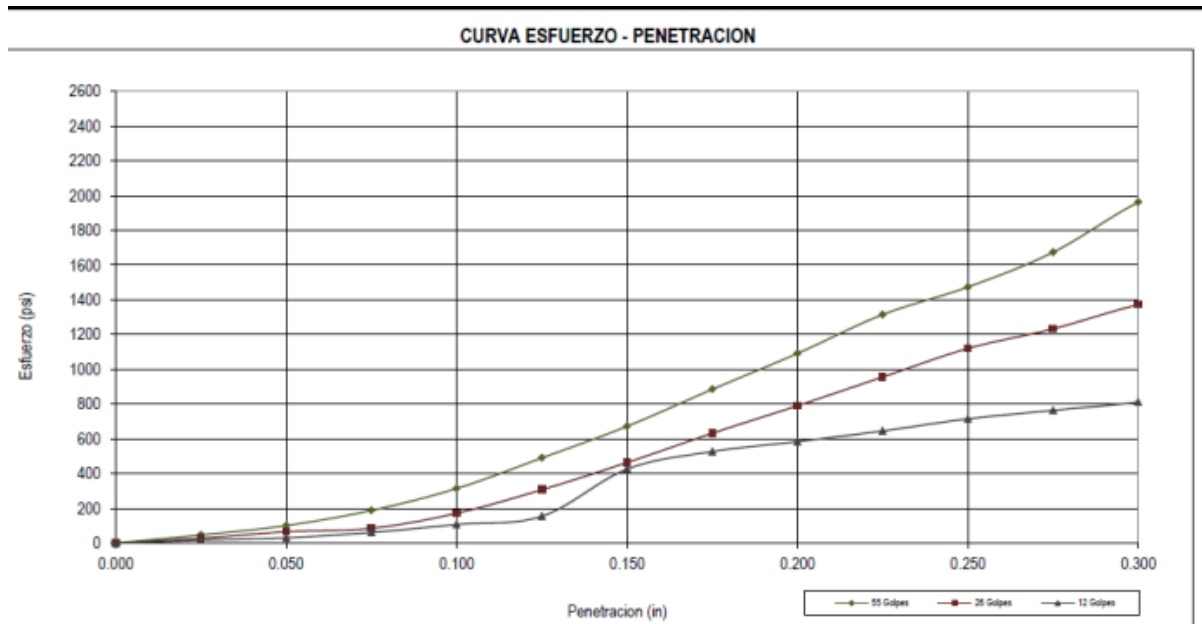


Figura 5-2. Curva esfuerzo – penetración a 55 golpes, 26 golpes, 12 golpes.

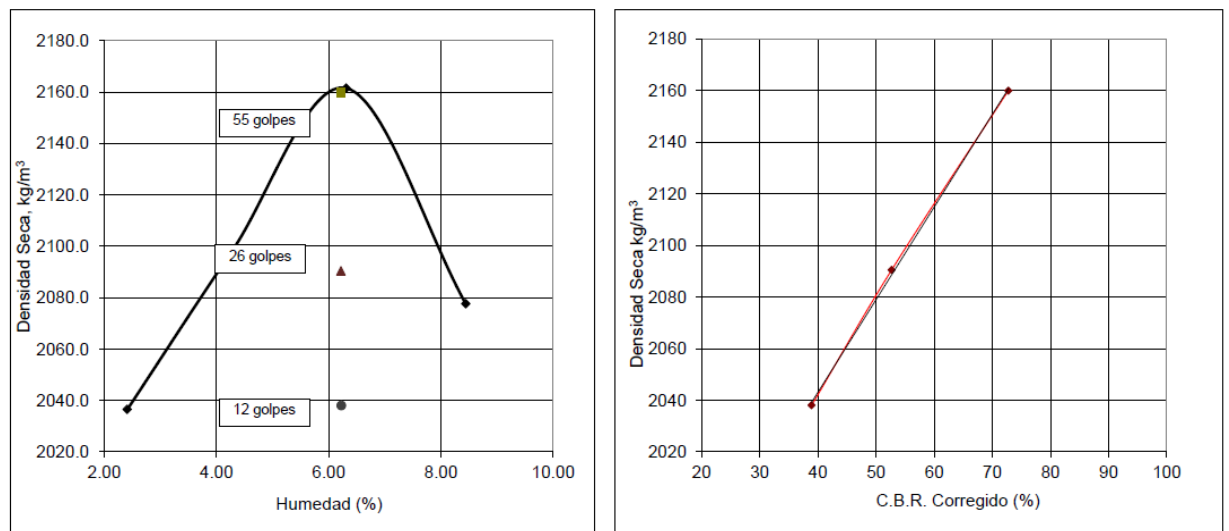


Figura 5-3. Curva densidad seca vs humedad y grafica densidad seca vs C.B.R corregido.

- Después de 4 días de inmersión, y aplicando los parámetros establecidos en la norma INV E-148, se establece que al **95%** de compactación con relación a la densidad seca máxima del ensayo de proctor modificado, el valor de C.B.R. obtenido fue **42.8%**, Porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, según el ensayo INV E-142, Método D: 94% mínimo. CBR  $\geq 30$ .
- Según los parámetros estándares se clasifica como material de calidad *BUENA y para uso afirmado* a los suelos cuyo C.B.R se encuentre entre un rango de 30 -60. (INV E-148).

### 5.1.3 Ensayo de Granulometría.

#### Análisis Granulométrico del Agregado

*Peso de la muestra: 2871.9 gr.*

Tabla 9. Resultado de ensayo granulometría.

TAMIZ No.	TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
2"	50	0	0	0	100
1 1/2"	37,5	132,4	4,6	4,6	95,4
1"	25	126,7	4,4	9	91
3/4"	19	162,3	5,7	14,7	85,3
3/8"	9,5	312,6	10,9	25,6	74,4
No. 4	4,75	379,1	13,2	38,8	61,2
No. 10	1,7	306,6	10,7	49,4	50,6
No. 40	0,425	671,8	23,4	72,8	27,2
No. 200	0,075	640,5	22,3	95,1	4,9
FONDO		139,9	4,9	100	0
<b>TOTAL</b>		<b>2871,9</b>	<b>100</b>		

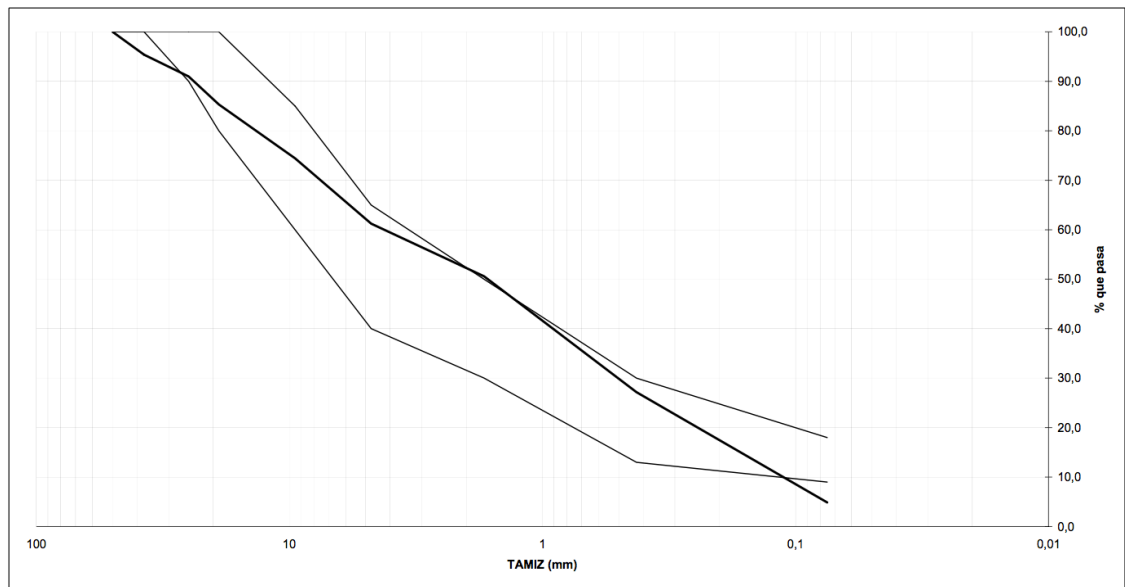


Figura 5-4. Curvas granulométrica: Agregado fino.

### Granulometria.

Según los parámetros establecidos por la ASTM para clasificar un suelo se debe tener en cuenta que, se puede establecer como un suelo bien gradado aquel suelo cuyo  $C_u > 4$  para materiales de agregado grueso.

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{4.75}{0.3} = 15.83$$

Ecuación 36. Granulometría parámetros establecidos por la ASTM

- De los cálculos anteriores comparados con la normativa de la ASTM podemos definir que el material granular se considera como bien gradado.

Como se puede ver en la curva granulométrica.

HUMEDAD 5%						
No. ENSAYO	PESO CONO LLENO	PESO CONO VACIO	PESO MATERIAL EXTRAIDO	CONSTANTE DEL CONO	DENSIDAD DE LA ARENA	DENSIDAD SECA
1	5750	2735	1967	1755	1397	2077
2	5750	2715	2017	1755	1397	2097
3	5735	2695	2030	1755	1397	2102
PROMEDIO						2092
						130,53 lb/ft3
HUMEDAD 6%						
No. ENSAYO	PESO CONO LLENO	PESO CONO VACIO	PESO MATERIAL EXTRAIDO	CONSTANTE DEL CONO	DENSIDAD DE LA ARENA	DENSIDAD SECA
1	5640	2665	1960	1755	1397	2117
2	5635	2730	1836	1755	1397	2104
3	5600	2550	2062	1755	1397	2099
PROMEDIO						2107
						131,45 lb/ft3
HUMEDAD 7%						
No. ENSAYO	PESO CONO LLENO	PESO CONO VACIO	PESO MATERIAL EXTRAIDO	CONSTANTE DEL CONO	DENSIDAD DE LA ARENA	DENSIDAD SECA
1	5390	2370	2020	1755	1397	2085
2	5375	2430	2056	1755	1397	2256
3	5375	2480	1991	1755	1397	2280
PROMEDIO						2207
						137,71 lb/ft3
HUMEDAD 8%						
No. ENSAYO	PESO CONO LLENO	PESO CONO VACIO	PESO MATERIAL EXTRAIDO	CONSTANTE DEL CONO	DENSIDAD DE LA ARENA	DENSIDAD SECA
1	5580	2625	2023	1755	1397	2181
2	5580	2585	2055	1755	1397	2144
3	5400	2410	2000	1755	1397	2095
PROMEDIO						2140
						133,52 lb/ft3
HUMEDAD 9%						
No. ENSAYO	PESO CONO LLENO	PESO CONO VACIO	PESO MATERIAL EXTRAIDO	CONSTANTE DEL CONO	DENSIDAD DE LA ARENA	DENSIDAD SECA
1	5275	2210	2133	1755	1397	2087
2	5275	2095	2326	1755	1397	2092
3	5125	2005	2230	1755	1397	2094
PROMEDIO						2091
						130,47 lb/ft3

- 
- Se puede apreciar que los valores tienen concordancia con la variación de la curva de compactación realizada para el ensayo proctor modificado.

**-ENSAYO DE GEOGAUGE:**

ENSAYO DEL GEOGAUGE HUMEDAD 5%					ENSAYO DEL GEOGAUGE HUMEDAD 6%					ENSAYO DEL GEOGAUGE HUMEDAD 7%					ENSAYO DEL GEOGAUGE HUMEDAD 8%				
	E9-S	SI-Y	Eg-Y	SI-S		E9-S	SI-Y	Eg-Y	SI-S		E9-S	SI-Y	Eg-Y	SI-S		E9-S	SI-Y	Eg-Y	SI-S
1	56,98	47,88	11,21	2,21	1	76,48	47,64	17,01	1,58	1	78,21	21,6	17,25	1,16	1	48,42	47,32	10,68	1,31
2	45,67	45,69	17,77	1,21	2	51,9	49,98	11,44	1,55	2	94,89	40,19	20,91	1,19	2	55,76	45,84	12,29	1,43
3	37,89	48,99	11,99	1,11	3	45,52	45,88	10,04	1,15	3	81,1	41,93	17,88	1,31	3	64,68	44,45	14,26	1,2
4	39,87	41,88	10,99	1,09	4	58,9	43,89	12,99	1,2	4	88,11	41,15	19,43	1,21	4	47,62	44,35	10,5	1,94
5	39,09	49,99	12,07	1,56	5	63,34	46,1	13,97	1,11	5	77,11	49,28	17,02	1,26	5	75,59	42,41	16,7	1,06
6	36,78	44,09	11,11	1,34	6	55,57	40,24	12,25	1,07	6	99,04	38,85	21,84	1,1	6	52,08	46,25	11,48	
7	36,99	50,98	11,09	1,12	7	78,55	42,69	17,32	1,09	7	84,39	41,94	18,61	2,4	7	52,96	38,67	11,68	1,23
8	59,03	47,09	13,08	1,18	8	52,26	45,2	11,52	2,17	8	88,79	41,05	19,56	1,18	8	60,93	49,54	10,51	1,19

-Tal como lo muestran los valores de las tablas que relacionan los resultados del ensayo con geogauge, se puede apreciar la tendencia de los resultados que describen un aumento y luego un descenso de la rigidez en función de la humedad, tal como lo hace la densidad. Por lo tanto se puede constatar la tendencia de variación directa de ambos parámetros.

## 6. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de la investigación se logró obtener bajo los parámetros estadísticos antes vistos la siguiente correlación,  $\rho_{DHumboldt} = -1,2025(\rho_D) + 281,01$  con la cual hemos podido probar que existe una asociación directa y confiable entre las mediciones tomadas en campo y las mediciones proyectadas por el modelo, técnicamente hablando la correlación con un  $R^2$  de 99% nos indica que existe una variabilidad casi nula entre las variables medidas. Esto aplicado al modelo de correlación:  $\rho_{Geogauge} = \left( \frac{1}{-0,000719 + 0,000067 * \rho_{DHumboldt}} \right)$ ; nos permite alcanzar el objetivo primario de esta investigación.

Siguiendo este modelo y estructura temática como se ha descrito en las páginas anteriores, esta investigación puede utilizarse como un soporte para futuros proyectos donde se requiera homologar un parámetro a través de una correlación.

## BIBLIOGRAFÍA

- **ATKINSONJ**, H.; **RICHARDSON**, D; Stallebrass S.E.Effect of recent stress history on the stiffness of overconsolidated soil.
- **BOWLES**, Joseph E. Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil 2ª Edición. Editorial McGrawHill, México 1981.
- **BURT**, Charles M.; **SIERRA**, Orvis; **ALEXANDER**, Nadya. Canal seepage refduction by soil compaction.
- **DOUGLAS**, C. Montgomery & George C. Runger, Applied statistics and probability for engineers, 3rd ed., Jonh Wiley & Sons. Inc., ISBN 0-471-20454-4., 2003
- **HUMBOLDT** MFG. CO., Scott Fiedler, Product Manager, GeoGauge Lecture, Humboldt Mfg. Co., Norridge, Illinois U.S.A., 2001.
- **JUÁREZ BADILLO**, Eulalio. RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. Mecánica de Suelos Tomo I – Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Limusa Noriega Editores, México 2000.
- **MORALES VALLEJO**, Pedro. Correlación y regresión, simple y múltiple, Universidad Pontificia Comillas, Facultad de Ciencias Humanas y Sociales, Madrid, 2011. Disponible en: <http://www.upcomillas.es/personal/peter/investigación/Regresion.pdf>
- **MURAT**, Diclei,; **SEMIH**, Erhan. Effect of foundation soil stiffness on the seismic performance of integral bridges.

- **RANDRUP**, Thomas B.. Soil compaction on construction sites.
- **SÁEZ CASTILLO**, Antonio, Apuntes de Estadística para Ingenieros, Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universidad de Jaén, España, 2011.
- **SAWANGSURIYA**, A; **BOSSCHER**, PJ, Edil TB. Application of soil stiffness Gauge in Assessing Small-Strain Stiffness of Sand with Different Fabrics and Densities,
- **SHAD**, M.; **SARGAND**, Teruhisa; **BASHAR**, Masada. Tarawneh. Use of soil stiffness Gauge in thermoplastic pipe installation.
- The measurement and interpretation of small strain stiffness of soils, VojkanJovicic.
- **YIMARZANO**, Shin- and **VILLAMIL**, Maria. University of Illinois-Urbana-Champaign, Urbana, IL, Cover Crops and Soil Compaction Alleviation Effects.



# **ANEXOS**

## Anexo A. OUTPUT MINITAB

### Análisis de regresión: Ln C vs. Ln K/m<sup>0,25</sup>

La ecuación de regresión es  
 $\text{Ln C} = -1,27 + 4,03 \text{ Ln K/m}^{0,25}$

Predictor	Coef	Coef. de EE	T	P	VIF
Constante	-1,27284	0,05286	-24,08	0,000	
Ln K/m <sup>0,25</sup>	4,03170	0,02298	175,44	0,000	1,000

S = 0,00418652 R-cuad. = 100,0% R-cuad.(ajustado) = 100,0%  
 PRESS = 0,000174873 R-cuad.(pred) = 99,97%

#### Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	1	0,53948	0,53948	30780,15	0,000
Error residual	3	0,00005	0,00002		
Total	4	0,53953			

Estadístico de Durbin-Watson = 1,58804

### Análisis de regresión: Densidad medida vs. Densidad determinada

La ecuación de regresión es  
 $\text{Densidad medida cono de arena} = 279 - 1,20 \text{ Densidad determinada HUMBOLDT}$

Predictor	Coef	Coef. de EE	T	P	VIF
Constante	279,198	2,234	125,00	0,000	
Densidad determinada HUMBOLDT	-1,20250	0,01823	-65,96	0,000	1,000

S = 0,0915276 R-cuad. = 99,9% R-cuad.(ajustado) = 99,9%  
 PRESS = 0,203543 R-cuad.(pred) = 99,44%

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	1	36,449	36,449	4350,87	<b>0,000</b>
Error residual	3	0,025	0,008		
Total	4	36,474			

## MODELO DE REGRESION OBTENIDO

Análisis de regresión: 1/DCA vs. Densidad HUMBOLDT

La ecuación de regresión es

$$1/DCA = -0,000719 + 0,000067 \text{ Densidad HUMBOLDT}$$

Predictor	Coef	Coef. de EE	T	P
Constante	-0,00071927	0,00006089	-11,81	0,001
Densidad HUMBOLDT	0,00006696	0,00000049	135,61	0,000

S = 2,495011E-06 R-cuad. = 100,0% R-cuad.(ajustado) = 100,0%

## ANÁLISIS DE VARIANZA

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	1	1,14481E-07	1,14481E-07	18390,29	<b>0,000</b>
Error residual	3	1,86752E-11	6,22508E-12		
Total	4	1,14500E-07			

## Prueba T e IC de dos muestras:

T de dos muestras para Densidad medida cono de arena vs. Modelo Geogauge

	N	Media	Desv.Est.	Media del Error Estándar
Densidad medida cono de arena	5	131,90	3,02	1,4
Modelo Geogauge	5	131,89	3,02	1,4

Diferencia =  $\mu$  (Densidad medida cono de arena) -  $\mu$  (Modelo Geogauge)

**Estimado de la diferencia: 0,00**

IC de 95% para la diferencia: (-4,51. 4,52)

Prueba T de diferencia = 0 (vs. no =): Valor T = 0,00 Valor P = 0,999 GL = 7

## Prueba de varianzas iguales:

Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándares

	N	Inferior	Desv.Est.	Superior
Densidad medida cono de arena	5	1,69057	3,01967	10,4467
Modelo Geogauge	5	1,69050	3,01955	10,4463

Prueba F (distribución normal)

Estadística de prueba = 1,00. **valor p = 1,000**

Prueba de Levene (cualquier distribución continua)

Estadística de prueba = 0,00. valor p = 1,000